

Dominik Damian Pisarski

AUTOREFERAT

OPIS OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

Warszawa 2022

SPIS TREŚCI

1. Życiorys	2
1.1. Imię i nazwisko	2
1.2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	2
1.3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	2
1.4. Kursy i szkolenia.....	3
2. Omówienie osiągnięcia naukowego.....	3
2.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	3
2.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	3
2.3. Ogólna charakterystyka osiągnięcia naukowego.....	4
2.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego przedstawionego w cyklu publikacji	10
2.5. Szczegółowe omówienie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	11
3. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.....	27
4. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	29
Literatura	29

1. Życiorys

1.1 Imię i nazwisko

Dominik Damian Pisarski

ORCID iD: 0000-0002-0515-3298

Web of Science ResearcherID: O-5343-2014

Scopus Author ID: 34979320500

1.2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

2014 Doktor nauk technicznych w zakresie dyscypliny Automatyka Przemysłowa (Automatique et Productique)

Université de Grenoble Alpes

Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal
Grenoble, Francja

„Collaborative ramp metering control: Application to Grenoble South Ring”

Promotor: prof. dr hab. inż. Carlos Canudas-de-Wit

2012 Doktor nauk technicznych w zakresie dyscypliny Mechanika

Instytut Podstawowych Problemów Techniki

Polskiej Akademii Nauk

Warszawa

„Semi-active control system for trajectory optimization of a moving load on an elastic continuum”

Promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Bajer

2006 Magister inżynier w zakresie dyscypliny Automatyka i Robotyka

Akademia Górniczo-Hutnicza,

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków

„Analiza rozkładu drgań maszyn i robotów”

Promotor: dr hab. inż. Wojciech Lisowski

1.3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

VI 2014 – obecnie Adiunkt
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
Warszawa

IX 2013 – XII 2013 Doktorant wizytujący
University of California, Berkeley
Berkeley, Stany Zjednoczone

VI 2011 – V 2014 Doktorant
INRIA Grenoble - Rhône-Alpes
Grenoble, Francja

X 2007 – V 2011 Doktorant
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
Warszawa

1.4 Kursy i szkolenia

2014 L'entrepreneuriat de A a Z, Grenoble, Francja
2013 34th Summer School of Automatic Control, Grenoble, Francja
2013 Industrial Marketing, Marketing in the Activities of Research & Development, Grenoble, Francja
2012 33th Summer School of Automatic Control, Grenoble, Francja
2012 HYCON EECI Graduate School on Control, Distributed Control, Paryż Supelec, Francja
2012 HYCON-EECI Graduate School on Control, Hybrid Dynamical Systems, Paryż Saclay, Francja
2011 4th HYCON2 PhD School on Control of Networked and Large-Scale Systems, Trento, Włochy

2. Omówienie osiągnięcia naukowego

2.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wskazano cykl ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które ukazały się w latach 2017-2020 pod tytułem:

**„Nowoczesne metody sterowania adaptacyjnego i rozproszonego
do tłumienia drgań konstrukcji”**

2.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

A1 **Pisarski D.**, Szmidt T., Konowrocki R.,

Decentralized semi-active structural vibration control based on optimal system modelling,
STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING,
DOI: 10.1002/stc.2624, Vol.27, No.11, pp.1-20, **2020**

*Impact Factor: 3.499 (Q1), *Punktacja MNiSW: 140

A2 **Pisarski D.**, Konowrocki R., Jankowski Ł.,

Scalable distributed optimal control of vibrating modular structures,
STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING,
DOI: 10.1002/stc.2502, Vol.27, No.4, pp.1-21, **2020**

*Impact Factor: 3.499 (Q1), *Punktacja MNiSW: 140

A3 Wasilewski M., **Pisarski D.**,

Adaptive semi-active control of a beam structure subjected to a moving load traversing with time-varying velocity,

JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION,
DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115404, Vol.481, pp.1-20, **2020**

*Impact Factor: 3.429 (Q1), *Punktacja MNiSW: 200

A4 **Pisarski D.**, Myśliński A.,

Suboptimal distributed state-feedback control of semi-active vibrating systems,
JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION,

DOI: 10.1016/j.jsv.2018.12.009, Vol.443, pp.637-651, **2019**

*Impact Factor: 3.123 (Q1), *Punktacja MNiSW: 200

A5 Wasilewski M., **Pisarski D.**, Bajer C.I.,

Adaptive optimal control for seismically excited structures,

AUTOMATION IN CONSTRUCTION,

DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102885, Vol.106, pp.102885-1-18, **2019**

*Impact Factor: 4.313 (Q1), *Punktacja MNiSW: 140

A6 **Pisarski D.**,

Decentralized stabilization of semi-active vibrating structures, MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING,

DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.08.003, Vol.100, pp.694-705, **2018**

*Impact Factor: 5.005 (Q1), *Punktacja MNiSW: 45

A7 **Pisarski D.**, Konowrocki R., Szmidt T.,

Dynamics and optimal control of an electromagnetically actuated cantilever pipe conveying fluid,

JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION,

DOI: 10.1016/j.jsv.2018.06.045, Vol.432, pp.420-436, **2018**

*Impact Factor: 3.123 (Q1), *Punktacja MNiSW: 35

A8 **Pisarski D.**, Myśliński A.,

Online adaptive algorithm for optimal control of structures subjected to travelling loads,

OPTIMAL CONTROL APPLICATIONS AND METHODS,

DOI: 10.1002/oca.2321, Vol.38, No.6, pp.1168-1186, **2017**

*Impact Factor: 1.614 (Q2), *Punktacja MNiSW: 30

*Wskaźnik cytowań (Impact Factor) oraz punktację MNiSW ustalono na podstawie danych obowiązujących w roku publikacji.

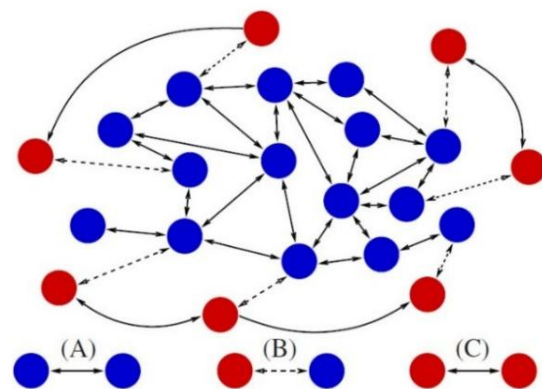
2.3. Ogólna charakterystyka osiągnięcia naukowego

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci obserwowany jest gwałtowny wzrost skali konstrukcji inżynierskich, co jest naturalną konsekwencją globalnej urbanizacji i rosnących potrzeb człowieka. Jak donosi Organizacja Narodów Zjednoczonych: do 2050 r. 6.8 miliarda ludzi będzie mieszkało w regionach silnie zurbanizowanych, dlatego możemy spodziewać się dalszego wzrostu skali i złożoności konstrukcji inżynierii lądowej oferującym ludziom schronienie, przestrzeń do pracy, transport oraz udogodnienia codziennego użytku. Coraz wyższy poziom złożoności konstrukcji wiąże się również z ciągłą ewolucją rzeczy i rosnącymi potrzebami w zakresie ich funkcjonalności i bezpieczeństwa, co obserwuje się w motoryzacji, kolei, lotnictwie oraz szeroko rozumianej robotyce. Wielkoskalowe konstrukcje i urządzenia złożone cechuje wysoka wrażliwość na wymuszenia zewnętrzne, przez co wymagają one szczególnej uwagi w zakresie niezawodnej oraz bezpiecznej eksploatacji, co stale stwarza nowe wyzwania dla naukowców i inżynierów zajmujących się systemami monitorowania i sterowania. Wielkoskalowe konstrukcje i urządzenia wymagają zupełnie nowego podejścia w zakresie projektowania metod stabilizacji i sterowania optymalnego. Sterowniki oparte na tradycyjnych architekturach scentralizowanych zawiodą w systemach wielkoskalowych, gdzie stopień komplikacji scentralizowanych systemów kontrolno-pomiarowych jest tak wysoki, że ilość

zastosowanego sprzętu i moce obliczeniowe użytych komputerów często przekraczają racjonalne wartości.

Zainspirowany powyższymi faktami swoją pracą naukową, po uzyskaniu stopnia doktora, poświęciłem opracowaniu nowych metod tłumienia drgań mechanicznych przy użyciu sterowania rozproszonego i adaptacyjnego, które można skutecznie zastosować do systemów współpracujących z wielkoskalowymi konstrukcjami i urządzeniami. Rozważmy poddany działaniu drgań mechanicznych układ opisany równaniem stanu $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), a(t), F(t))$, gdzie $x \in X \subset R^n$, $u \in U \subset R^m$, a oraz F oznaczają kolejno globalny wektor zmiennych stanu, wektor funkcji sterowania, wektor zmiennych w czasie parametrów oraz wektor wymuszenia zewnętrznego. Sterowanie rozproszone oparte jest o wykorzystanie współpracujących ze sobą sterowników (Rys. 1), gdzie każdy z nich wykorzystuje ograniczoną informację o stanie układu (najczęściej jest to informacja o stanie układu w najbliższym otoczeniu sterownika). Mianowicie, zakładamy, że funkcja sterowania u_i , zaimplementowana w sterowniku i , zależy od lokalnego wektora zmiennych stanu $x_i \in X_i \subset R^{n_i}$, który utworzony jest z elementów globalnego wektora zmiennych stanu x , a rozmiar wektora x_i jest znacząco mniejszy od rozmiaru wektora x (tzn. $n_i \ll n$). Sterowanie rozproszone wywodzi się z metod obliczeń rozproszonych, gdzie algorytmy tzw. konsensusu pojawiły się w latach 60. i 70. XX wieku. Od tego czasu sterowanie rozproszone było szeroko rozwijane do rozmaitych zastosowań inżynierskich, wykorzystując jego niezawodność, funkcjonalność oraz wydajność obliczeniową. W przypadku złożonych konstrukcji inżynierskich pożądane jest, by sterownik mógł występować jako modułowe urządzenie typu „plug and play”, co pozwala na łatwy montaż, naprawę lub szybką re-konfigurację systemu sterowania. Systemy sterowania rozproszonego, gdzie indywidualne sterowniki wyposażone są w czujniki pomiarowe,

pozwalają na realizację aranżacji modułowych, które są tanie w budowie i eksploatacji oraz pozwalają na szybką integrację z istniejącymi systemami monitorowania stanu konstrukcji. Sterowanie rozproszone odgrywa również istotną rolę w bezpieczeństwie. Nieprawidłowe działanie jednego ze sterowników lub błąd w pomiarach lokalnego stanu konstrukcji ma ograniczony wpływ na decyzje pozostałych sterowników, co zmniejsza ryzyko wystąpienia wysokich amplitud drgań lub niestabilności, które mogłyby powodować poważne uszkodzenia konstrukcji. Korzyścią wynikającą z zastosowania sterowania rozproszonego jest również to, że większość procedur obliczeniowych może być wykonywana równolegle, wykorzystując jednostki obliczeniowe oraz pamięć indywidualnych sterowników. Możliwe jest zatem rozbięcie wielkoskalowych problemów sterowania optymalnego na szereg problemów o stosunkowo niskiej złożoności obliczeniowej, pozwalając na częstą aktualizację optymalnych sygnałów sterowania, co jest kluczowe w przypadku konstrukcji poddanych wymuszeniom o szybkozmiennych charakterystykach. Sterowanie, które w układzie opisanym równaniem stanu $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), a(t), F(t))$ zdolne jest do modyfikacji funkcji sterowania przy



Rys. 1. Konstrukcja przedstawiona w postaci zbioru sprzężonych dynamicznie podukładów (niebieskie punkty) sterowana przy użyciu sterownika o architekturze rozproszonej (czerwone punkty). (A) – dynamicznie sprzężone podukłady konstrukcji; (B) – lokalna pętla sprzężenia zwrotnego między podukładem i indywidualnym sterownikiem; (C) – współpracujące ze sobą sterowniki, wymieniające informację o decyzji sterowania oraz zmiennych stanu podukładów.

zmianie parametrów wewnętrznych $\mathbf{a}(t)$ i/lub wymuszenia zewnętrznego $\mathbf{F}(t)$, nazywane jest sterowaniem adaptacyjnym. Synergia samouczących się procedur i modułowych architektur zapewnianych przez adaptacyjne i rozproszone sterowanie może odgrywać istotną rolę, nie tylko w bezpiecznej eksploatacji konstrukcji wielkoskalowych, ale również w projektowaniu nowoczesnych, „inteligentnych fabryk”, oferując wielozadaniowość i elastyczność w re-konfiguracji strukturalnej zaangażowanych do produkcji maszyn, robotów oraz narzędzi.

W cyklu artykułów [A1-A8] swoją uwagę skupiłem na problematyce tłumienia drgań mechanicznych, gdzie analizowałem konstrukcje i elementy konstrukcyjne poddane wymuszeniom o charakterze impulsowym lub długotrwałym. Proponowane przeze mnie metody sterowania dedykowane są urządzeniom aktywnym (z możliwością bezpośredniego sterowania siłą), jak i półaktywnym (gdzie skutek sterowania modyfikacji podlega parametr tłumienia i/lub sztywności). Niemniej jednak, podążając za aktualnym trendem, który promuje stosowanie urządzeń półaktywnych, w szczególności opartych na działaniu inteligentnych materiałów, które oferują bezpieczną, energooszczędną pracę i stosunkowo łatwą integrację z konstrukcjami złożonymi, moje badania poświęcone były głównie półaktywnym układom sterowania oraz odpowiadającej im klasie dwuliniowych równań dynamicznych (z ang. bilinear dynamical systems). W przedstawionej poniżej charakterystyce mojego osiągnięcia naukowego wyróżniam dwie grupy problemów związanych z opracowaniem rozproszonych oraz adaptacyjnych metod sterowania.

Wyniki wstępne dotyczące rozproszonego sterowania drgań mechanicznych przedstawiłem w pracy [A6], gdzie podjąłem problem stabilizacji drgań swobodnych półaktywnej konstrukcji wspornikowej. Układ został wyposażony w zestaw półaktywnych bloków elastomerowych o modyfikowanych pod wpływem zmiennego pola magnetycznego parametrach sztywności i tłumienia. Celem przeprowadzonych badań było określenie, w jaki sposób sterowanie z ograniczoną informacją o stanie układu wpływa na skuteczność stabilizacji konstrukcji. Rozproszone funkcje sterowania wyznaczono poprzez rozwiązanie zadań optymalizacji, gdzie za funkcje celu przyjęto wskaźniki związane z szybkością rozpraszania energii podukładów lokalnych, reprezentujących segmenty konstrukcji będące w bezpośrednim otoczeniu sterowników z zintegrowanymi czujnikami drgań. Pożądane zależności funkcji sterowania rozproszonego od zmiennych stanu uzyskano poprzez odpowiedni dobór podukładów lokalnych. Przy użyciu symulacji numerycznych wykazałem, że sterownie rozproszone wykorzystujące wyłącznie informacje o stanie lokalnym konstrukcji jest w stanie stabilizować pierwszą postać drgań własnych ze skutecznością porównywalną do uzyskanej w przypadku sterowania scentralizowanego, gdzie każdy ze sterowników wykorzystuje pełną informację o stanie konstrukcji. Zgodnie z oczekiwaniami, w miarę występowania kolejnych postaci drgań własnych, sterowanie rozproszone wymagało informacji o stanie coraz większego segmentu konstrukcji. Niemniej jednak, wykazałem, że rozproszone funkcje sterowania, które są zależne od zmiennych stanu, które odpowiadają nieznacznie nakładającym się podukładom, może zagwarantować wysoką wydajność stabilizacji konstrukcji nawet w przypadku występowania wyższych częstotliwości drgań, będących skutkiem wymuszenia udarowego. Analizując wartości szczytowe trajektorii drgań, zaobserwowałem, że sterowanie scentralizowane przewyższa skutecznością sterowanie rozproszone o zaledwie 2-3%. Idea rozproszonego sterowania do stabilizacji drgań inteligentnej konstrukcji wspornikowej została następnie rozszerzona w pracy [A4], gdzie moim celem było opracowanie sterowania suboptymalnego, które aproksymuje działanie strategii opartej o rozwiązanie zadania sterowania optymalnego ze skończonym horyzontem czasu. W tym celu dokonałem analizy kształtu rozwiązania optymalnego i na podstawie uzyskanych wyników zaprojektowałem sparametryzowaną przełączającą funkcję

sterowania zależną od zmiennych stanu. Jednym z parametrów założonej funkcji sterowania jest macierz, której struktura determinuje zbiór zmiennych stanu, od których jawnie zależy funkcja sterowania, co z kolei umożliwia wybór pożądanej architektury systemu sterowania rozproszonego. Elementy macierzy zostały zoptymalizowane, aby zagwarantować najlepszą wydajność sterowania przy założonej funkcji celu będącej miarą całkowitej energii konstrukcji. Zaproponowana metoda została przebadana przy różnych warunkach początkowych oraz założeniu różnych architektur sterownika rozproszonego. Otrzymane wyniki zostały zestawione z wynikami otrzymanymi przy założeniu scentralizowanego sterowania optymalnego oraz sterowania rozproszonego zaproponowanego w [A6]. Zaobserwowano, że sterowanie suboptymalne może być konkurencyjne w stosunku do strategii optymalnych przy średnio 10% wzroście wartości wskaźnika energii. W porównaniu z heurystyczną metodą zaproponowaną w [A6] sterowanie suboptymalne wykazało poprawę o 22%, co uzasadnia zastosowanie dodatkowych procedur optymalizacyjnych.

W pracy [A2] zaprezentowałem suboptymalną metodę sterowania rozproszonego, którą w szczególności dedykuję konstrukcjom o architekturze modułowej. Celem było zagwarantowanie funkcjonalnej jednorodności algorytmu decyzyjnego realizowanego przez indywidualne sterowniki oraz skalowalności zastosowanych procedur optymalizacyjnych. Założenia te pozwoliły na opracowanie sterownika zdolnego do pracy z konstrukcjami wielkoskalowymi przy zachowaniu modułowej aranżacji systemu sterowania. Metoda dedykowana jest konstrukcjom sterowanym aktywnie (siłowo), scharakteryzowanym przez liniowy układ dynamiczny. Metoda bazuje na podziale konstrukcji na zbiór sprzężonych dynamicznie podukładów. Z każdym z podukładów związany jest indywidualny sterownik, który pobiera informację o lokalnym stanie konstrukcji oraz wymienia tę informację z sąsiadującymi sterownikami w celu wyznaczenia krótkoterminowej prognozy wartości sił oddziaływania między podukładami. Do prognozowania przebiegu tych sił zastosowałem autoregresyjny liniowy model dynamiczny, który został dołączony do modelu dynamicznego podukładu. Takie podejście pozwoliło na sformułowanie zbioru liniowo-kwadratowych zadań sterowania optymalnego, które rozwiązywane są równolegle przy użyciu jednostek obliczeniowych poszczególnych sterowników. W celu uwzględnienia zmiany charakterystyk sił sprzęgających, optymalne rozwiązanie wyznaczone jest cyklicznie zgodnie ze schematem z przesuwającym horyzontem czasowym (z ang. receding horizon control). Z uwagi na fakt, iż rozmiary problemów sterowania optymalnego w przypadku poszczególnych podukładów są stosunkowo niewielkie, aktualizację funkcji sterowania można realizować w czasie rzeczywistym. Metoda została zweryfikowana numerycznie w przypadku konstrukcji wspornikowej wyposażonej w aktywnie sterowane siłowniki elektromagnetyczne, poddanej różnym warunkom początkowym. Zaproponowana strategia sterowania rozproszonego wykazała wysoką skuteczność stabilizacji drgań, a wyznaczona dla niej wartość funkcji celu była nieznacznie gorsza - o 0.2-1.4% - w porównaniu do tradycyjnego scentralizowanego sterowania liniowo-kwadratowego.

W odróżnieniu od metod zaprezentowanych w pracach [A2][A4][A6], gdzie opracowanie sterowania rozproszonego bazowało na tradycyjnych modelach numerycznych konstrukcji, uzyskanych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, a zależność funkcji sterowania od założonych zbiorów zmiennych stanu osiągnięto przez odpowiedni dobór funkcji sterowania lub podział konstrukcji na podukłady, w pracy [A1] zaprezentowałem, w jaki sposób można utworzyć model dynamiczny konstrukcji, by przy zastosowaniu standardowego, scentralizowanego prawa sterowania, uzyskać żądane zależności między funkcjami sterowania a zmiennymi stanu. W podejściu tym zaproponowałem dyskretyzację problemu ciągłego, opisanego dwuliniowym równaniem różniczkowym cząstkowym,

przy użyciu metody Galerkina, ze specjalnie zdefiniowaną podprzestrzenią, na którą rzutowane jest rozwiązanie rozważanego równania dynamicznego. Przedstawiłem formalny dowód na to, że odpowiedni wybór bazy tej podprzestrzeni oraz optymalizacja wynikowych macierzy bezwładności i sztywności gwarantuje, że założone scentralizowane prawo sterowania, zaproponowane w pracy [Leitmann1994], może być realizowane przy użyciu wyłącznie lokalnych informacji o stanie konstrukcji. Metoda została przebadana w przypadku tłumienia drgań konstrukcji półaktywnego przęsła, opartego na zestawie tłumików o sterowalnych parametrach tłumienia oraz sztywności. Metoda okazała się konkurencyjna w stosunku do tradycyjnego podejścia scentralizowanego, przy którym uzyskano nieznacznie korzystniejszą wartość wskaźnika jakości sterowania (0.7-5.3%).

Zasadniczą rolą sterowania adaptacyjnego w problemach tłumienia drgań mechanicznych jest zagwarantowanie dostosowania decyzji sterowania do zmian, jakie zachodzą w charakterystykach wymuszeń lub parametrach wewnętrznych układu. Skuteczność sterowania adaptacyjnego jest zwykle powiązana z częstotliwością aktualizacji sygnałów sterowania. W przypadku konstrukcji półaktywnych, których dynamika opisana jest przez równania różniczkowe nieliniowe (w szczególności dwuliniowe), aktualizacja sygnałów sterowania optymalnego wymaga cyklicznego rozwiązywania zagadnienia brzegowego, które poza najprostszymi przypadkami jest złożone obliczeniowo i wymaga czasu nawet przy zaangażowaniu wydajnych jednostek obliczeniowych. Jednym z problemów dynamiki konstrukcji, gdzie wymagana jest częsta aktualizacja decyzji sterowania, jest półaktywne tłumienie drgań konstrukcji nośnej poddanej ruchomemu obciążeniu o zmiennej w czasie prędkości. Problem ten podjąłem w publikacji [A8], w której — w odróżnieniu od moich wcześniejszych prac, gdzie koncentrowałem się na strategiach sterowania w pętli otwartej [Pisarski2018][Pisarski2010] — poświęciłem uwagę adaptacyjnemu sterowaniu ze sprzężeniem zwrotnym, gdzie przełączające sygnały sterowania zależą od zmierzonej prędkości ruchomego obciążenia. Zaproponowane przeze mnie prawo sterowania adaptacyjnego zostało opracowane przy wykorzystaniu referencyjnych rozwiązań optymalnych obliczonych przy założonej stałej prędkości obciążenia oraz zbioru funkcji charakteryzujących wrażliwość dynamiki układu ze względu na zmianę prędkości obciążenia oraz stanu początkowego układu. Dane te zostają wstępnie obliczone i są przechowywane w pamięci sterownika. Realizowany w czasie rzeczywistym algorytm sterowania, który korzysta z przechowywanych w pamięci danych i bazuje na stosunkowo prostej procedurze iteracyjnej, wymaga niewielkiego nakładu obliczeniowego, co pozwala na niemal natychmiastową aktualizację optymalnych decyzji sterowania, nawet przy użyciu mało wydajnych jednostek obliczeniowych. Metoda została zweryfikowana numerycznie, gdzie dowiodła swojej skuteczności w szerokim zakresie zmian prędkości ruchomego obciążenia. W porównaniu do rozwiązania optymalnego, obliczonego przy założeniu pełnej znajomości charakterystyki prędkości obciążenia, opracowane sterowanie adaptacyjne skutkowało nieznacznym wzrostem wartości założonego funkcjonału celu - związanego z odkształceniem konstrukcji pod ruchomym obciążeniem - o 2.2%. Alternatywne podejście do problemu tłumienia drgań konstrukcji nośnej poddanej działaniu obciążenia przemieszczającego się ze zmienną w czasie prędkością przedstawiono w pracy [A3]. Do określenia sił działających na konstrukcję, wynikających z ruchomego obciążenia, zaproponowałem zastosowanie modelu autoregresyjnego, który został dołączony do modelu dynamicznego konstrukcji. Parametry modelu autoregresyjnego są aktualizowane okresowo, by właściwie scharakteryzować działanie obciążenia przy zmianach jego prędkości. Adaptacyjna funkcja sterowania została wyznaczona na podstawie rozwiązania algebraicznego równania Lapunowa i zależy od rozszerzonego wektora stanu związanego z konstrukcją oraz ewolucyjnym, autoregresyjnym modelem obciążenia. Adaptacja decyzji sterowania wymaga

aktualizacji parametrów modelu ewolucyjnego oraz rozwiązania równania Lapunowa. Stosunkowo niska złożoność obliczeniowa tych operacji umożliwiła implementację metody w czasie rzeczywistym. Sterowanie poddano weryfikacji numerycznej w przypadku konstrukcji wyposażonej w zestaw półaktywnych tłumików magnetoreologicznych. Analizie poddane zostały trzy przypadki ruchu obciążenia, uwzględniając fazy przyspieszania, opóźnienia oraz chwilowego zatrzymania. Wyniki symulacji zestawiono z rezultatami otrzymanymi w przypadku tłumienia pasywnego oraz sterowania optymalnego przy założeniu pełnej znajomości charakterystyki prędkości ruchomego obciążenia. W każdym z przypadków sterowanie adaptacyjne wykazało znacznie wyższą skuteczność redukcji drgań konstrukcji w porównaniu ze strategią tłumienia pasywnego. Zestawienie z wynikami uzyskanymi w przypadku rozwiązania optymalnego dowiodło, że proponowana metoda adaptacyjna może być postrzegana jako suboptymalna. Uśredniona wartość założonego funkcjonału celu w przypadku metody adaptacyjnej była gorsza o 1.8% w porównaniu ze strategią sterowania optymalnego. W pracy [A3] zaprezentowałem również formalne dowody matematyczne, które pokazują, że proponowane sterowanie gwarantuje asymptotyczną stabilność układu oraz korzystniejszą wartość funkcjonału celu w porównaniu do optymalnej strategii tłumienia pasywnego. Warto wspomnieć, że metody zaproponowane w pracach [A3][A8] są ogólne dla klasy układów dynamicznych opisanych dwuliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi i mogą być zastosowane w szerokiej gamie problemów związanych ze sterowaniem układów mechanicznych poddanych wymuszeniu o zmiennej charakterystyce

Kolejnym zagadnieniem związanym z tłumieniem drgań mechanicznych, gdzie wymagane jest dostosowanie decyzji sterowania do zmieniającej się charakterystyki wymuszenia, jest stabilizacja drgań samowzbudnych (typu flutter) w rurach transportujących płyn. W pracy [A7] opracowałem optymalną strategię sterowania przełączającego do zastosowania w półaktywnych tłumikach elektromagnetycznych typu ruchowego (z ang. electromagnetic devices of the motional type) wykorzystujących zjawisko prądów wirowych. Celem sterowania adaptacyjnego jest dostosowanie okresowego schematu przełączania sygnału sterowania do zmierzonej prędkości przepływu płynu. Metoda została zweryfikowana za pomocą symulacji numerycznych przeprowadzonych w przypadku trzech zakresów prędkości przepływu: niskiej podkrytycznej, gdzie przyspieszenie Coriolisa transportowanego płynu powoduje, że siła tłumienia w układzie jest dominująca; wysokiej podkrytycznej, gdzie siły bezwładności płynu zaczynają dominować w dynamice układu; niskiej nadkrytycznej, gdzie pojawiają się drgania typu flutter. Skuteczność sterowania adaptacyjnego została poddana ocenie przez porównanie z rozwiązaniami tłumienia pasywnego przy założeniu zastosowania magnesów stałych. Sterowanie pozwoliło obniżyć wartość wskaźnika związanego z energią drgań konstrukcji nawet o 85%. Skuteczność proponowanej metody została później potwierdzona eksperymentalnie w pracy [Szmidt2019], gdzie opracowałem uproszczoną - zależną od lokalnego stanu konstrukcji, funkcję sterowania, która aproksymuje działanie optymalnego schematu przełączania. W pracy [A7] sformułowałem i udowodniłem matematycznie praktyczny warunek, który pozwala określić czy przy założonych parametrach konstrukcji, tłumików oraz przepływu płynu istnieje półaktywne sterowanie stabilizujące.

Najwyższy czas na pracę [A5] poświęconą sterowaniu adaptacyjnemu do optymalnej stabilizacji drgań wielkoskalowych budynków poddanych działaniu trzęsienia ziemi. W odróżnieniu od prac [A3][A7][A8], gdzie adaptacyjne strategie sterowania dedykowane były konstrukcjom i elementom konstrukcyjnym wyposażonym w urządzenia półaktywne, praca [A5] dotyczy problemu sterowania aktywnego z zastosowaniem siłowników hydraulicznych. Moim celem było opracowanie efektywnej metody

adaptacyjnej w przypadku, gdzie złożoność obliczeniowa problemu optymalizacji związana jest z rozmiarem układu dynamicznego, a nie jego nieliniową strukturą. Przy założeniu zastosowania siłowników aktywnych, gdzie siły reprezentowane są w postaci funkcji zależnych liniowo od sygnałów sterowania, możliwe było przedstawienie układu dynamicznego w postaci liniowej oraz wykorzystanie metody regulatora liniowo-kwadratowego. Nowością zaproponowanej metody jest wprowadzenie liniowego modelu dynamicznego do charakteryzowania krótkookresowej prognozy wymuszenia układu związanego z trzęsieniem ziemi. Pozwoliło to na określenie bezpośredniej zależności funkcji sterowania od przebiegu wymuszenia, które scharakteryzowane jest przy użyciu dodatkowych zmiennych stanu. Adaptacja decyzji sterowania bazuje na cyklicznym rozwiązywaniu algebraicznego równania Riccatiego, które wynika ze sformułowanego zadania sterowania optymalnego z nieskończonym horyzontem czasu. Potwierdzono, że w przypadku konstrukcji wielkoskalowych, czas wymagany do rozwiązania problemu sterowania optymalnego z nieskończonym horyzontem czasu jest znacznie krótszy aniżeli czas potrzebny do rozwiązania równoważnego problemu przy założeniu horyzontu skończonego, który gwarantowałby porównywalną skuteczność stabilizacji drgań. W celu zapewnienia istnienia rozwiązania problemu sterowania optymalnego, funkcjonal celu został zdefiniowany przy pomocy metody przesunięcia alfa (z ang. alpha-shift method). Zaproponowany algorytm adaptacyjny został przebadany w przypadku konstrukcji budynku wielokondygnacyjnego stanowiącego model wzorcowy. Analizując wartości rozmaitych miar drgań, wykazano, że metoda adaptacyjna jest skuteczniejsza od regulatora liniowo-kwadratowego Gaussa oraz sterowania H-nieskończoność. W szczególności, wartość szczytowa przyspieszenia jednej z kondygnacji budynku została zredukowana nawet o 50%.

2.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego przedstawionego w cyklu publikacji [A1]-[A8]

Poniższe zestawienie stanowi podsumowanie moich najważniejszych osiągnięć naukowych przedstawionych w cyklu prac [A1]-[A8]:

- Opracowanie stabilizującego sterowania rozproszonego bazującego na optymalnym modelu zastępczym [A1].
- Opracowanie skalowalnej metody optymalnego tłumienia drgań aktywnych konstrukcji modułowych [A2].
- Opracowanie praktycznej, wydajnej metody sterowania adaptacyjnego do zastosowania w konstrukcjach półaktywnych poddanych działaniu ruchomego obciążenia [A3].
- Opracowanie suboptymalnej metody sterowania rozproszonego do stabilizacji drgań konstrukcji półaktywnych [A4].
- Opracowanie wydajnej metody aktywnego sterowania adaptacyjnego dedykowanej konstrukcjom poddanych działaniu wymuszeń o charakterze okresowym lub losowym [A5].
- Opracowanie rozproszonego heurystycznego prawa sterowania do stabilizacji drgań półaktywnych konstrukcji modułowych [A6].
- Sformułowanie warunku stabilizowalności oraz opracowanie sterowania optymalnego w problemie tłumienia drgań samowzbudnych typu flutter [A7].
- Opracowanie metody adaptacji czasów przełączeń w sterowaniu optymalnym konstrukcji półaktywnych poddanych działaniu wymuszenia o zmiennej charakterystyce [A8].

2.5. Szczegółowe omówienie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

2.5.1. Opracowanie stabilizującego sterowania rozproszonego bazującego na optymalnym modelu zastępczym [A1]

(Pisarski D., Szmidt T., Konowrocki R., Decentralized semi-active structural vibration control based on optimal system modelling, Structural Control and Health Monitoring, Vol.27, No.11, pp.1-20, 2020)

a) Opis problemu badawczego

Niniejsza praca przedstawia nowe podejście do projektowania sterowania rozproszonego do tłumienia drgań półaktywnych konstrukcji nośnych. Głównym założeniem przy opracowaniu metody była architektura systemu sterowania, gdzie każdy ze sterowników korzysta wyłącznie z informacji o lokalnym stanie konstrukcji wyznaczonej przy pomocy sąsiadującego z nim czujnika drgań. System sterowania, który bazuje na lokalnych pomiarach stanu, często określany jest jako zdecentralizowany lub całkowicie zdecentralizowany. Założona architektura systemu sterowania może być w praktyce realizowana przy użyciu zestawu modułów typu „plug and play” wyposażonych w czujniki stanu, jednostki obliczeniowe i półaktywne elementy wykonawcze. Modułowa architektura oznacza nie tylko szybki montaż systemu, ale jest korzystna w utrzymaniu, oferując możliwość szybkiej naprawy lub rekonfiguracji układu. Systemy modułowe są szczególnie korzystne w przypadku zastosowania do konstrukcji wielkoskalowych, gdzie tradycyjne scentralizowane układy sterowania zawodzą ze względu na bardzo wysoki koszt obliczeniowy związany z przetwarzaniem informacji o stanie globalnym. W pracy [A1] analizie została poddana konstrukcja wyposażona w tłumiki półaktywne o modyfikowalnych parametrach tłumienia oraz sztywności. Celem sterowania było efektywne tłumienie drgań swobodnych konstrukcji.

Zweryfikowano, że tradycyjne, półaktywne metody sterowania, gdzie funkcje sterowania zależą wyłącznie od lokalnych zmiennych stanu, np. metoda PAR [Mroz2010] lub skyhook [Harwood1974], mogą być skutecznie wykorzystane do tłumienia drgań układów dynamicznych o niewielkich rozmiarach (do kilku stopni swobody), takich jak ruchomy oscylator czy zawieszenie pojazdu. Zarówno PAR, jak i skyhook mają na celu stabilizację układu w punktach związanych z położeniem tłumików. W przypadku konstrukcji wielkoskalowych takie nieskoordynowane działanie sterowników może prowadzić do sytuacji, w której tłumiki rozpraszają pewną porcję energii drgań, ale jednocześnie znaczna część tej energii jest stale przekazywana do pozostałej części konstrukcji. W rezultacie układ jest stabilny, ale szybkość rozpraszania energii drgań jest na tyle niska, że układ sterowania z powodzeniem mógłby zostać zastąpiony przez tradycyjne rozwiązania pasywne. Moim celem było opracowanie specjalnego modelu konstrukcji oraz bazującej na nim metody sterowania, która podobnie jak PAR czy skyhook gwarantuje zdecentralizowaną architekturę systemu sterowania, ale w odróżnieniu od wspomnianych strategii wprowadza - w niejawny sposób - koordynację działania pomiędzy indywidualnymi sterownikami i gwarantuje stabilizację układu z szybkością rozpraszania energii porównywalną do rozwiązań scentralizowanych.

b) Metodologia

Rozważany układ został wstępnie opisany za pomocą dwuliniowego równania różniczkowego cząstkowego, uwzględniającego model strukturalny przęsła oraz wpływ tłumików półaktywnych. W celu opracowania funkcji sterowania, równanie dynamiczne zostało przekształcone do układu dwuliniowych równań różniczkowych zwyczajnych scharakteryzowanych przez dwie macierze. Wykazałem, że odpowiednia struktura tych macierzy pozwala na uzyskanie zakładanej decentralizacji

funkcji sterowania przy wykorzystaniu stabilizującego prawa przełączanego zaproponowanego w pracy [Leitmann1994]. Wynik ten został sformułowany w postaci warunku wystarczającego istnienia stabilizujących zdecentralizowanych funkcji sterowania. Wymagane struktury macierzy układu uzyskuje się poprzez dyskretyzację problemu ciągłego opisanego równaniem różniczkowym cząstkowym metodą Galerkiną ze specjalnie dobraną podprzestrzenią, na którą rzutowane jest rozwiązanie rozważanego równania dynamicznego. Wykazano, że odpowiedni wybór bazy tej podprzestrzeni oraz optymalizacja otrzymanych macierzy masowej oraz sztywności prowadzi do założonych diagonalnych postaci ww. macierzy. Rozwiązanie problemu optymalizacji macierzy masowej i sztywności układu pozwala na uzyskanie kompromisu między pożądaną zdecentralizowaną formą funkcji sterowania oraz dokładnością odwzorowania dynamiki układu przy zastosowaniu zaproponowanego modelu zastępczego. Przedstawiony sposób doboru bazy i optymalizacji macierzy modelu zastępczego można zastosować również w przypadku innych konstrukcji, np. przęseł z dodatkowymi podporami sprężystymi lub masami skupionymi. Weryfikację metody przeprowadzono numerycznie w przypadku drgań ugiętej wstępnie belki Eulera-Bernoulliego podpartej na zestawie tłumików półaktywnych, dla których założono, że współczynniki sprężystości i tłumienia są liniowo zależne od funkcji sterowania. Skuteczność zaproponowanej metody przebadana została przy użyciu porównań do zdecentralizowanej metody PAR. Założono, że w przypadku każdej z metod wykorzystana została identyczna zdecentralizowana architektura systemu sterowania, a funkcje sterowania zależą wyłącznie od lokalnych zmiennych stanu konstrukcji. Informacje te gromadzone są przy pomocy czujników znajdujących się w położeniu odpowiadającym pozycjom elementów wykonawczych. Do celów porównawczych, w ramach eksperymentów numerycznych, wykonano również serię symulacji przy założeniu scentralizowanego prawa sterowania zaproponowanego w pracy [Leitmann1994], gdzie wykorzystano model bazujący na metodzie elementów skończonych, a do obserwacji globalnego stanu konstrukcji użyto zbioru dodatkowych czujników drgań.

c) Podsumowanie wyników

Pierwsza seria symulacji została przeprowadzona w przypadku, gdzie konstrukcja została wstępnie ugięta do kształtu odpowiadającemu pierwszej funkcji własnej belki swobodnie podpartej. Pod względem efektywności stabilizacji układu, zaproponowane sterowanie rozproszone wykazało wyniki porównywalne do uzyskanych przy założeniu strategii scentralizowanej, z niemal identycznymi trajektoriami wychylenia. W tym przypadku metoda PAR okazała się mniej skuteczna - szczytowa wartość trajektorii wychylenia uzyskanego przy założeniu metody PAR była o 9% wyższa w porównaniu do metody scentralizowanej. Analizując wartości założonej funkcji jakości sterowania związanej z całkowitą energią mechaniczną konstrukcji, zaproponowana metoda okazała się nieznacznie mniej skuteczna od strategii scentralizowanej z różnicą względną na poziomie 2.9%, przewyższając strategię PAR o 4.7%. Wprowadzanie kolejnych funkcji własnych do kształtu ugięcia wstępnego konstrukcji skutkowało tym, że metoda PAR znacząco traciła na efektywności (wzrost wartości funkcji jakości sterowania nawet o 25.4% w porównaniu do przypadku scentralizowanego), podczas gdy opracowana metoda skutkowała działaniem porównywalnym do wariantu scentralizowanego (wzrost wartości funkcji jakości na poziomie 0.7-5.3%). Otrzymane wyniki potwierdziły, że wprowadzenie modelu zastępczego do opracowania sterowania zdecentralizowanego może znacząco poprawić jego skuteczność również w zakresie wyższych częstotliwości drgań.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Sformułowanie i formalny dowód warunku wystarczającego istnienia zdecentralizowanego sterowania stabilizującego (Sekcja 3.2).

- Opracowanie modelu konstrukcji, który gwarantuje, że bazujące na nim sterowanie przełączające spełnia ww. warunek (Sekcja 4).
- Obszerna analiza skuteczności opracowanej strategii sterowania z licznymi porównaniami do istniejących metod (Sekcja 5).

2.5.2. Opracowanie skalowalnej metody optymalnego tłumienia drgań aktywnych konstrukcji modułowych [A2]

(Pisarski D., Konowrocki R., Jankowski Ł., Scalable distributed optimal control of vibrating modular structures, Structural Control and Health Monitoring, Vol.27, No.4, pp.1-21, 2020)

a) Opis problemu badawczego

Konstrukcje wielkoskalowe są szczególnie wrażliwe na zakłócenia zewnętrzne i wymagają niezawodnej oraz bezpiecznej eksploatacji. Niniejsza praca poświęcona jest wielkoskalowym konstrukcjom modułowym, które już dziś są powszechne w systemach transportu (pociągi), przemyśle motoryzacyjnym (oferując synergie dla więcej niż jednej klasy pojazdów), inżynierii lądowej (wieżowce, mosty, konstrukcje oparte na układach w stanie samonapężenia - ang. tensegrity system) oraz technice lotniczej (satelity). Modułowość jawi się również jako kluczowa cecha maszyn i robotów, które realizują procesy produkcyjne w inteligentnych fabrykach Przemysłu 4.0.

W tej pracy skupiłem się na klasie układów mechanicznych, które mogą być reprezentowane jako zbiór sprzężonych podukładów, gdzie dynamika każdego z nich opisana jest układem liniowych równań różniczkowych zwyczajnych. Wprowadziłem również założenie, że każdy z podukładów poddany jest sterowaniu przy użyciu siłowników aktywnych, których działanie ma na celu stabilizację drgań konstrukcji z uwzględnieniem wskaźnika jakości, który bierze pod uwagę zarówno szybkość zbieżności zmiennych stanu układu do punktu równowagi, jak i energię zużytą przez siłowniki. System sterowania oparty jest o architekturę rozproszoną, gdzie założyłem, że do każdego z podukładów konstrukcji przyporządkowany jest indywidualny sterownik. Każdy ze sterowników wykorzystuje informację o zmiennych stanu podukładu lokalnego oraz informacje uzupełniające pozyskane dzięki komunikacji ze sterownikami sąsiednimi. Dodatkowo założyłem, że wszystkie sterowniki realizują identyczną procedurę obliczeniową. Założenia te mają na celu zredukowanie wielkoskalowego zadania sterowania optymalnego do zbioru zadań o stosunkowo niskiej złożoności obliczeniowej, które mogą być rozwiązywane równoległe przy użyciu poszczególnych sterowników. Wymiana informacji pomiędzy sąsiednimi sterownikami ma na celu wprowadzenie koordynacji ich działania, gwarantując skuteczność porównywalną do tej, jaka wynika z zastosowania tradycyjnego podejścia do optymalnego sterowania bazującego na scentralizowanej metodzie regulatora liniowo-kwadratowego.

b) Metodologia

Dla każdego podukładu konstrukcji modułowej założono liniową dynamikę oraz liniowy wpływ siły sterującej. Założenia te można zastosować do szerokiej klasy inteligentnych konstrukcji/elementów konstrukcyjnych sterowanych przy użyciu siłowników hydraulicznych lub elektromagnetycznych, silników elektrycznych, sztucznych mięśni zbudowanych na bazie polimerów, czy stopów z pamięcią kształtu. Kluczowym elementem do opracowania metody sterowania był sposób wyznaczania sił oddziaływania między sąsiednimi podukładami (modułami konstrukcji). Z uwagi na fakt, iż w przypadku każdego z podukładów problem sterowania optymalnego uwzględnia ewolucję sił oddziaływania w pewnym skończonym horyzoncie czasowym, konieczne było opracowanie efektywnej metody przewidywania tych sił. W przypadku nowoczesnych konstrukcji, gdzie ze względu na redukcję masy ich dynamikę cechuje szybka odpowiedź na działanie czynników zewnętrznych, precyzyjne

przewidywanie charakterystyki szybko-zmiennych sił wymuszenia jest kluczem do skutecznego sterowania. Do prognozowania sił oddziaływania między podukładami wykorzystałem model autoregresyjny (AR), który korzysta z bieżących oraz przeszłych (w pewnym horyzoncie czasu) pomiarów zmiennych stanu odpowiadających za te siły. Wybór modelu autoregresyjnego motywuję dwoma kluczowymi faktami. Po pierwsze, model autoregresyjny wykazuje wysoką dokładność w prognozowaniu trajektorii o charakterze periodycznym, a taki charakter jest oczekiwany w przypadku sił oddziaływania między modułami konstrukcji. Po drugie, model AR daje się przedstawić w postaci liniowego równania dynamicznego, a zatem siły oddziaływania mogą być dołączone do dynamiki konstrukcji bez zmian jej liniowego charakteru, co będzie korzystne przy rozwiązywaniu zadania sterowania optymalnego. Do wyznaczania parametrów modelu AR wykorzystałem metodę Burga. Warto również wspomnieć, że do wyznaczenia tych parametrów wykorzystana jest założona komunikacja pomiędzy sąsiadującymi sterownikami. Po uwzględnieniu modelu sił oddziaływania sformułowałem globalny rozproszony problem sterowania optymalnego jako zbiór liniowo-kwadratowych problemów sterowania optymalnego zdefiniowanych na skończonym horyzoncie czasu. Każdy z tych problemów rozwiązywany jest okresowo, zgodnie z koncepcją sterowania z przesuwnym horyzontem (ang. receding horizon control), co pozwala uwzględnić zmiany w charakterystykach sił oddziaływania.

Zaproponowaną metodę zweryfikowano numerycznie w przypadku aktywnie sterowanej konstrukcji wspornikowej wyposażonej w siłowniki elektromagnetyczne. Skuteczność sterowania została oceniona przez porównania ze sterowaniem scentralizowanym, będącym rozwiązaniem problemu regulatora liniowo-kwadratowego. Dodatkowo przedstawiłem porównania do strategii zdecentralizowanej, gdzie przyjąłem zbiór niezależnie działających sterowników, zgodnie z podejściem przedstawionym w pracy [Palacios2011]. W celu potwierdzenia możliwości zastosowania sterowania rozproszonego w czasie rzeczywistym, przeanalizowałem złożoność obliczeniową zawartych w metodzie procedur przy założeniu różnych wartości parametrów modelu AR.

c) Podsumowanie wyników

Pierwszą część symulacji przeprowadzono w przypadku, gdzie belka wspornikowa została wstępnie wygięta do kształtu odpowiadającego jej pierwszej funkcji własnej, a następnie zwolniona wykonując drgania swobodne. W tym przypadku metoda rozproszona oraz scentralizowana wykazały porównywalną skuteczność, z niemal identycznymi trajektoriami wychYLENIA i bardzo zbliżoną wartością energii zużytej przez siłowniki. W odniesieniu do przyjętej miary jakości sterowania metoda rozproszona okazała się o 1.4% gorsza od strategii scentralizowanej. W przypadku sterowania zdecentralizowanego, zaproponowanego w pracy [Palacios2011], pogorszenie to wynosiło aż 463%. Jednocześnie do działania przyjętych siłowników elektromagnetycznych sterowanie zdecentralizowane [Palacios2011] skutkowało zużyciem energii o 94% wyższej aniżeli w przypadku ww. metod. Spójność trajektorii wychYLENIA będących wynikiem działania sterowania rozproszonego i scentralizowanego została również zachowana w przypadku obecności wyższych częstotliwości drgań. Zakładając kombinację pierwszych trzech funkcji własnych do początkowego ugięcia konstrukcji, zaobserwowałem marginalny wzrost (o 0.7%) wartości miary jakości sterowania w przypadku metody rozproszonej. Dla porównania; w przypadku strategii zdecentralizowanej wzrost ten wynosił 71,9%. Uzyskane wyniki potwierdziły, że komunikacja pomiędzy sterownikami, w tym przypadku pozwalająca na prognozowanie sił oddziaływania między modułami konstrukcji, odgrywa istotną rolę w projektowaniu efektywnego rozproszonego systemu sterowania.

Analiza wpływu parametrów modelu do prognozowania warunków brzegowych wykazała, że zmiana liczby próbek dotycząca przeszłych wartości zmiennych stanu ma nieznacznie większy wpływ na skuteczność sterowania aniżeli zmiana rzędu modelu AR. Należy jednocześnie zauważyć, że zmiana liczby próbek wartości zmiennych stanu uwzględniona w modelu AR wpływa jedynie na złożoność wyznaczania współczynników modelu, podczas gdy zmiana rzędu modelu AR wpływa zarówno na czas obliczeniowy potrzebny do wyznaczania współczynników modelu AR, jak i złożoność obliczeniową związaną z rozwiązywaniem równania Riccatiego. W rezultacie łączny czas wymagany do realizacji procedury sterowania przy zmniejszeniu (zwiększeniu) wspomnianej liczby próbek skrócił (wydłużył) się zaledwie o 1.3% (0.9%). Z kolei zmniejszenie lub zwiększenie rzędu modelu AR spowodowało, że zmiany czasu obliczeń wynosiły odpowiednio 22.1% lub 100.1%.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie skalowalnego optymalnego sterowania rozproszonego do stabilizacji drgań układów opisanych liniowym równaniem dynamicznym (Sekcja 2 i 3).
- Opracowanie modelu autoregresyjnego do krótkoterminowego prognozowania sił oddziaływania między modułami układu (Sekcja 3.1).
- Kompleksowa analiza skuteczności oraz złożoności obliczeniowej proponowanej metody sterowania rozproszonego z porównaniami do istniejącymi rozwiązań przy założeniu architektury scentralizowanej oraz zdecentralizowanej (Sekcja 4).

2.5.3. Opracowanie praktycznej, wydajnej metody sterowania adaptacyjnego do zastosowania w konstrukcjach półaktywnych poddanych działaniu ruchomego obciążenia [A3]

(Wasilewski M., Pisarski D., Adaptive semi-active control of a beam structure subjected to a moving load traversing with time-varying velocity, Journal of Sound and Vibration, Vol.481, pp.1-20, 2020)

a) Opis problemu badawczego

Niniejsza praca jest wynikiem kontynuacji moich badań nad półaktywnymi metodami sterowania dedykowanymi układom o zmiennej w czasie charakterystyce wymuszenia. W odróżnieniu od idei przedstawionej w pracy [A8], gdzie adaptacja sterowania była realizowana poprzez parametryzację i dostosowanie czasów przełączania funkcji sterowania stanowiących rozwiązanie problemu sterowania optymalnego zdefiniowanego w pętli otwartej, celem pracy [A3] było opracowanie metody umożliwiającej uwzględnienie zmian parametrów wymuszenia bezpośrednio w strukturze funkcji sterowania, która korzysta z pętli zamkniętej, a zatem wykazuje większą odporność na niepewności modelu. W tym celu zaproponowałem zastosowanie praktycznego, stabilizującego prawa sterowania zależnego od zmiennych stanu konstrukcji, wyprowadzonego na podstawie metody Lapunowa. Nowatorskie podejście polegało na opracowaniu adaptacyjnego modelu, określającego aktualny charakter wymuszenia, a następnie integrację tego modelu z równaniem dynamicznym konstrukcji oraz zastosowanie rozszerzonego wektora stanu stanowiącego argument założonej funkcji sterowania. Model wymuszenia spełniać musiał wymagania dotyczące struktury układu dynamicznego oraz niskiej złożoności obliczeniowej przy wyznaczaniu i aktualizacji jego parametrów, by umożliwić odwzorowanie szybkozmiennego wymuszenia. Moją intencją było, aby metoda była ogólna dla klasy układów mechanicznych sterowanych półaktywnie, których dynamika opisana jest dwuliniowym równaniem różniczkowym. Szczególną uwagę poświęcono jednak problemowi tłumienia drgań półaktywnej konstrukcji nośnej poddanej obciążeniu ruchomemu, gdzie celem sterowania adaptacyjnego było dostosowanie pracy tłumików magnetoreologicznych do zmieniającej się charakterystyki prędkości obciążenia.

b) Metodologia

Pierwszym krokiem przy opracowaniu sterowania było przedstawienie dynamiki rozważanej konstrukcji w wymaganej formie układu dwuliniowych równań różniczkowych zwyczajnych. Do tego celu przyjęto model ciągły bazujący na równaniu belki Eulera-Bernoulliego oraz zastosowano metodę separacji zmiennych przestrzennych i czasu. Kolejnym krokiem było opracowanie modelu wymuszenia związanego z przejazdem ruchomego obciążenia. Stosując odpowiednią aproksymację wektora wzbudzenia, model ten został przedstawiony jako liniowy układ dynamiczny z parametrem danym w postaci macierzy zależnej od prędkości obciążenia. Model wymuszenia został następnie dołączony do modelu konstrukcji, tworząc układ dynamiczny z rozszerzonym wektorem stanu uwzględniającym zmienne stanu konstrukcji oraz zmienne stowarzyszone z modelem wymuszenia. Przełączające prawo sterowania, zależne od rozszerzonego wektora stanu, zostało wyprowadzone przy użyciu metody Lapunowa (Twierdzenie 1). Następnie wykazano, że prawo to gwarantuje wyższą skuteczność stabilizacji układu (w sensie szybkości zbieżności wektora stanu do punktu równowagi) w porównaniu z optymalną (najlepszą) strategią tłumienia pasywnego (Twierdzenia 2 oraz 3). Adaptacja funkcji sterowania wymaga pomiarów położenia i prędkości przemieszczającego się obciążenia oraz rozwiązania równania Lapunowa (Algorytm 1). Z uwagi na fakt, iż metody numeryczne do rozwiązywania równania Lapunowa są wydajne obliczeniowo, parametry funkcji sterowania można aktualizować na tyle często, by uwzględnić szybkie zmiany w charakterystyce prędkości ruchomego obciążenia. Skuteczność opracowanej metody została przebadana w przypadku konstrukcji nośnej wspartej czterema półaktywnymi tłumikami magnetoreologicznymi. Przeanalizowano trzy przypadki przejazdu obciążenia, uwzględniając przyspieszenia, spowolnienia oraz chwilowe zatrzymanie.

c) Podsumowanie wyników

Ocenę skuteczności zaproponowanego sterowania adaptacyjnego dokonano poprzez porównanie z trzema metodami: optymalnym tłumieniem pasywnym; sterowaniem optymalnym (A) w pętli otwartej, gdzie za funkcję celu przyjęto całkowite ugięcie konstrukcji; sterowaniem optymalnym (B) w pętli otwartej, gdzie za funkcję celu założono całkowite ugięcie konstrukcji pod ruchomym obciążeniem. W pierwszym przypadku przyjęto stałe przyspieszenie obciążenia. Analiza trajektorii ilustrującej ugięcie konstrukcji pod ruchomym obciążeniem wykazała, że sterowanie adaptacyjne skutkuje działaniem zbliżonym do metod optymalnych. Pod względem przyjętej miary całkowitego ugięcia konstrukcji pod obciążeniem, sterowanie optymalne (B) było skuteczniejsze od strategii adaptacyjnej o 3.1%. Jednocześnie, sterowanie adaptacyjne skutkowało poprawą założonej miary o 2.6% w odniesieniu do sterowania optymalnego (A). W tym samym przypadku metoda adaptacyjna znacznie przewyższała skutecznością strategię pasywną (o 34.4% według przyjętej miary).

W drugim z analizowanych przypadków obciążenie poruszało się ze stałym opóźnieniem, aż do zatrzymania w połowie długości konstrukcji. W związku z tym, że charakterystyka ugięcia konstrukcji w tym przypadku przez dłuższy czas symulacji była zbliżona do tych, jakie uzyskanoby pod wpływem obciążenia statycznego, każda z rozważanych metod sterowania wykazała działanie podobne do strategii tłumienia pasywnego. Według przyjętej miary sterowanie adaptacyjne okazało się nieznacznie gorsze od metod optymalnych (o 1.0%-1.9%).

W ostatnim przypadku obciążenie realizowało przejazd po całej długości konstrukcji, a trajektoria jego prędkości obejmowała odcinki z opóźnieniem oraz przyspieszeniem. Podobnie jak w poprzednich przypadkach pomiar ugięcia konstrukcji pod obciążeniem potwierdził, że sterowanie adaptacyjne wykazuje wysoką skuteczność w redukcji drgań układu. W zestawieniu z metodą optymalną (A)

oraz (B) strategia adaptacyjna spowodowała marginalny wzrost założonego wskaźnika jakości odpowiednio o 0.7% oraz 3.2%. Podsumowując wyniki symulacji, stwierdzono, że proponowana metoda adaptacyjna jest bliska optymalnej. Średnia różnica między sterowaniem adaptacyjnym a strategiami optymalnymi, mierzona za pomocą przyjętego wskaźnika jakości, wyniosła 1.8%.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie modelu dynamicznego wymuszenia wywołanego ruchomym obciążeniem (Sekcja 2.2).
- Opracowanie praktycznej, wydajnej metody sterowania adaptacyjnego do zastosowania w układach półaktywnych opisanych układem dwuliniowych równań różniczkowych zwyczajnych (Sekcja 3).
- Sformułowanie i formalny dowód ilościowych korelacji między sterowaniem adaptacyjnym a optymalną strategią tłumienia pasywnego (Twierdzenie 2 oraz 3, Sekcja 3.3)
- Obszerna analiza skuteczności opracowanej metody sterowania z porównaniami do strategii optymalnych (Sekcja 4).

2.5.4. Opracowanie suboptymalnej metody sterowania rozproszonego do stabilizacji drgań konstrukcji półaktywnych [A4]

(Pisarski D., Myśliński A., Suboptimal distributed state-feedback control of semi-active vibrating systems, Journal of Sound and Vibration, Vol.443, pp.637-651, 2019)

a) Opis problemu badawczego

Praca poświęcona jest klasie układów dynamicznych opisanych równaniem dwuliniowym, która reprezentuje szeroką gamę inteligentnych konstrukcji lub elementów konstrukcyjnych wyposażonych w materiały półaktywne, takie jak bloki tłumiące na bazie elastomerów czy powszechnie stosowane cieczki magnetoreologiczne. Kluczowe założenie przy opracowaniu metody sterowania dotyczyło struktur funkcji sterowania, które w sposób jawny zależą od dowolnego zbioru zmiennych stanu, by umożliwić realizację dowolnej architektury rozproszonej systemu sterowania. Wymagane było również, by metoda sterowania charakteryzowała się skutecznością zbliżoną do tej, jaką oferuje rozwiązanie problemu sterowania optymalnego w pętli otwartej. Z uwagi na ten fakt punktem wyjścia była analiza struktury rozwiązań problemu sterowania optymalnego zdefiniowanego przy założeniu skończonego horyzontu czasu. Na podstawie tej struktury, dla każdego z lokalnych sterowników zdefiniowałem sparametryzowaną funkcję sterowania zależną od zmiennych stanu. Wstępny dobór parametrów funkcji sterowania wynikał z preferowanej architektury rozproszonej. Kolejnym krokiem było opracowanie wydajnego obliczeniowo algorytmu, który zagwarantuje optymalne dostrojenie tych parametrów przy uwzględnieniu założonej funkcji celu związanej z całkowitą energią konstrukcji. Jednym z kluczowych etapów pracy była analiza efektywności opracowanej metody sterowania ze względu na zaburzenia stanu początkowego. Ostatecznie celem było przebadanie skuteczności proponowanego sterowania przez porównania z istniejącymi metodami.

b) Metodologia

W celu zbadania struktury funkcji sterowania optymalnego w pętli otwartej sformułowano i przeanalizowano warunek konieczny optymalności wykorzystując zasadę maksimum Pontriagina. Funkcje sterowania spełniające ten warunek są typu bang-bang (funkcje przełączające), gdzie przełączanie między skrajnymi wartościami zbioru sterowań dopuszczalnych jest określone

przez funkcję kwadratową zależną od stanu oraz stanu sprzężonego wynikającego z założonego funkcjonatu celu. Ponieważ moim celem było opracowanie sterowania rozproszonego, które naśladuje rozwiązanie scentralizowane w pętli otwartej, wprowadziłem aproksymację przełączającego prawa sterowania, wykorzystując funkcję arcus tangens zależną od stanu konstrukcji oraz macierzy, której celem jest wprowadzenie założonej struktury rozproszonego systemu sterowania. Następnym krokiem była optymalizacja elementów wspomnianej macierzy, by zapewnić oczekiwaną wydajność metody sterowania. Do tego celu sformułowałem problem optymalizacji, wykorzystując funkcjonat celu przyjęty w przypadku problemu zdefiniowanego przy założeniu pętli otwartej. Następnie, korzystając z rachunku wariacyjnego, określiłem pochodną funkcjonatu celu względem elementów macierzy, a także opracowałem numeryczny algorytm optymalizacji, wykorzystując metodę najszybszego spadku. Uzyskane w wyniku optymalizacji suboptymalne sterowanie rozproszone zostało przebadane w przypadku półaktywnej konstrukcji wspornikowej wyposażonej w zestaw elastomerowych bloków tłumiących. Do scharakteryzowania wpływu sterowanego pola magnetycznego na parametry lepkosprężyste bloków tłumiących wykorzystano model materiałowy Kelvina-Voigta. Dla belek stanowiących konstrukcję wspornikową przyjąłem równanie Eulera-Bernoulliego i zastosowałem metodę elementów skończonych, aby ostatecznie uzyskać dwuliniowy układ dynamiczny, który przyjęto do opracowania funkcji sterowania. Zaproponowana metoda została przebadana w przypadku różnych warunków początkowych przy założeniu różnych architektur rozproszonego systemu sterowania. Skuteczność metody suboptymalnej została oceniona na podstawie porównań ze strategią optymalną w otwartej pętli. Ponadto wyniki zostały zestawione z otrzymanymi przy wykorzystaniu optymalnej strategii pasywnej oraz podejścia heurystycznego zaproponowanego w pracy [A6].

c) Podsumowanie wyników

Studium przypadku zostało przeprowadzone przy założeniu 14 czujników drgań rozmieszczonych na dwóch belkach wspornikowych oraz 3 sterownikach. Ze względu na konfigurację czujników współpracujących ze sterownikami, wyróżniłem trzy architektury systemu sterowania: scentralizowaną, w której wszystkie sterowniki wykorzystywały informacje pochodzące z 14 czujników; rozproszoną, gdzie każdy sterownik korzystał z informacji 6 sąsiednich czujników; zdecentralizowaną, gdzie każdy sterownik miał dostęp do informacji z 2 sąsiednich czujników. W pierwszym z analizowanych przypadków, gdzie każdą z belek konstrukcji wspornikowej wstępnie wygięto do kształtu odpowiadającego ich pierwszej funkcji własnej, suboptymalne sterowanie scentralizowane, rozproszone oraz zdecentralizowane wykazywały bardzo podobną skuteczność w redukcji drgań. W porównaniu ze sterowaniem optymalnym w pętli otwartej przypadki scentralizowane, rozproszone i zdecentralizowane spowodowały niewielki wzrost wartości funkcjonatu celu odpowiednio o 0.7%, 2.5% i 7.4%. Analizując szczytowe wartości wychylenia konstrukcji, wzrost ten wyniósł odpowiednio 2.4%, 2.8% i 6.1%. Zestawienie wyników otrzymanych w przypadku sterowania suboptymalnego i heurystycznego dowiodło, że metoda suboptymalna wykazuje lepszą skuteczność stabilizacji drgań w przypadku każdej z założonych architektur systemu. Strategia heurystyczna skutkowała podwyższeniem wartości funkcjonatu celu o 15.0%, 25.3% oraz 28.3% odpowiednio dla przypadku scentralizowanego, rozproszonego oraz zdecentralizowanego. Istotną poprawę zaobserwowano również przy zestawieniu sterowania suboptymalnego z przypadkiem optymalnego tłumienia pasywnego (redukcja wartości założonego funkcjonatu celu o 50.7%-52.8%). Mając na uwadze aspekty praktyczne oraz uwzględniając fakt, że stan początkowy konstrukcji może być trudny do precyzyjnego oszacowania, interesowało mnie, jak opracowane

sterowanie radzi sobie w przypadku zaburzenia stanu początkowego. W tym celu, dla sterowań suboptymalnych założyłem macierze zoptymalizowane przy założeniu ugięcia wstępnego belek do kształtu odpowiadającego im pierwszej funkcji własnej, a następnie przeprowadziłem symulacje dynamiki układu przy stopniowym wzroście zaburzenia warunków początkowych. W przypadku niewielkich perturbacji (uzyskanych przez wprowadzenie drugiego oraz trzeciego modu drgań do ugięcia wstępnego konstrukcji przy amplitudzie względnej na poziomie 5%-15% dla modu drugiego oraz 5% dla modu trzeciego) wykazałem przewagę architektury scentralizowanej, co było wynikiem najlepszego odwzorowania optymalnych czasów przełączeń w funkcjach sterowania. W przypadku większego zaburzenia warunku początkowego (uzyskanego przez podniesienie udziału trzeciego modu do 10-15%) sterowanie rozproszone wykazało wyższą skuteczność stabilizacji drgań, aniżeli w przypadkach scentralizowanym i zdecentralizowanym.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie suboptymalnego rozproszonego sterowania dla szerokiej klasy konstrukcji półaktywnych (Sekcja 3).
- Obszerne badania numeryczne w celu walidacji opracowanej metody sterowania z porównaniami do istniejących metod konkurencyjnych (Sekcja 4).

2.5.5. Opracowanie wydajnej metody aktywnego sterowania adaptacyjnego dedykowanej konstrukcjom poddanym działaniu wymuszeń o charakterze okresowym lub losowym [A5]

(Wasilewski M., Pisarski D., Bajer C.I., Adaptive optimal control for seismically excited structures, Automation in Construction, Vol.106, pp.102885-1-18, 2019)

a) Opis problemu badawczego

Praca ta poświęcona jest problemowi aktywnego sterowania konstrukcji opisanych liniowym równaniem dynamicznym i poddanych wymuszeniom o charakterze losowym. Typowe podejście do rozwiązania tego problemu wykorzystuje metodę liniowo-kwadratowego regulatora Gaussa (LQG), gdzie zakłada się, że wymuszenie występuje w postaci białego szumu gaussowskiego. W odróżnieniu od tego podejścia naszą intencją była próba scharakteryzowania wymuszenia przez model dynamiczny oraz zastosowanie periodycznej aktualizacji funkcji sterowania, by uwzględnić zmiany parametrów tego modelu. Do opisu wymuszenia zdecydowaliśmy się posłużyć liniowym układem dynamicznym, co umożliwiło zastosowanie regulatora liniowo-kwadratowego, który ze względu na stosunkowo niską złożoność obliczeniową pozwala na częstą aktualizację funkcji sterowania, również w przypadku konstrukcji wielkoskalowych. Naszym celem było również porównanie złożoności obliczeniowej problemu sterowania optymalnego ze skończonym oraz nieskończonym horyzontem czasowym, aby ustalić, które sformułowanie jest korzystniejsze w przypadku układów średniej i wielkiej skali. Główną ideą było opracowanie metodologii, którą można zastosować do szerokiej klasy układów mechanicznych opisanych liniowymi układami dynamicznymi. Niemniej jednak, działanie opracowanej metody zostało przeanalizowane w przypadku wielkoskalowej konstrukcji stanowiącej obiekt porównawczy, którego dynamika opisana jest przy użyciu metody elementów skończonych. W celu zbadania niezawodności proponowanego sterowania zdecydowaliśmy się na uwzględnienie ograniczeń praktycznych związanych z brakiem obserwowalności, opóźnieniami w układzie pomiarowym oraz fizycznymi parametrami siłowników.

b) Metodologia

Rozważaną konstrukcję stanowił 20-kondygnacyjny smukły budynek wyposażony w zestaw sterowanych siłowników hydraulicznych i poddany wzbudzeniu trzęsienia ziemi. Szczegółowy model

konstrukcji opracowano przy użyciu oprogramowania ANSYS. Na potrzeby zastosowania zaproponowanej metody sterowania opracowano również model uproszczony, który wraz z procedurami do generowania sygnałów sterujących został zaimplementowany w środowisku programistycznym MATLAB. Następnie opracowano interfejs między środowiskami MATLAB i ANSYS, który umożliwił przesyłanie informacji o stanie konstrukcji oraz sygnałów sterujących w celu realizacji założonej pętli sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. Na potrzeby adaptacji sterowania, w oparciu o ewolucyjny model autoregresyjny, opracowano dynamiczne równanie wymuszenia. Równanie to zostało dołączone do równania dynamicznego konstrukcji, w wyniku czego otrzymano układ rozszerzony. Dla tego układu sformułowano problem optymalnego sterowania liniowo-kwadratowego z nieskończonym horyzontem czasu. Wybór takiego sformułowania dokonano na podstawie analizy czasów obliczeń potrzebnych do rozwiązania dwóch analogicznych problemów sterowania optymalnego, ze skończonym i nieskończonym horyzontem czasu, gdzie brano pod uwagę różne rozmiary układu dynamicznego konstrukcji oraz — w przypadku pierwszego problemu — długości horyzontu czasu. W celu zapewnienia istnienia rozwiązania problemu sterowania optymalnego z nieskończonym horyzontem czasu, zastosowano metodę przesunięcia alfa z wykładnikiem, który gwarantuje spełnienie warunku sterowalności. Adaptacja sterowania wymaga cyklicznej aktualizacji parametrów modelu autoregresyjnego wymuszenia oraz rozwiązania algebraicznego równania Riccatiego. Skuteczność proponowanej metody została przebadana w przypadku czterech scenariuszy trzęsienia ziemi. Wyniki porównawcze zostały opracowane przy zastosowaniu metody regulatora liniowo-kwadratowego-Gausa oraz sterowania H-nieskończoność.

c) Podsumowanie wyników

Opracowaną adaptacyjną metodę sterowania przetestowano w przypadku czterech sygnałów wymuszenia. Dwa z tych sygnałów miały charakter losowy i zostały określone na podstawie pomiarów sejsmicznych trzęsień ziemi w Kobe w 1995 r. i El Centro w 1940 r. Pozostałe dwa sygnały były okresowe i w nich przyjęliśmy odpowiednio pierwszą częstotliwość własną oraz kombinację pierwszych dziesięciu częstotliwości własnych rozważanej konstrukcji. Celem analizy opracowanej metody przy założeniu wymuszeń okresowych było przetestowanie jej działania w warunkach silnych podmuchów wiatru lub przejazdów ciężkich pojazdów w sąsiedniej infrastrukturze. Dla każdego scenariusza przeanalizowaliśmy wartości ośmiu miar, takich jak przesunięcia między kondygnacjami, przemieszczenia/przyspieszenia kondygnacji czy ścinanie podstawy konstrukcji. W przypadkach trzęsień ziemi proponowana metoda sterowania adaptacyjnego skutkowało obniżeniem amplitud przemieszczeń o 18.1%-23.0% dla sygnału Kobe i 5.6%-22.2% dla El Centro w porównaniu z metodami LQG i H-nieskończoność. Poprawa miary związanej z przyspieszeniami wyniosła odpowiednio 11.1% -22.2% i 15.0%-27.1%. Istotną poprawę zaobserwowano w przypadku założonych sygnałów okresowych, gdzie w porównaniu z metodami LQG i H-nieskończoność sterowanie adaptacyjne spowodowało redukcję amplitud przemieszczeń o 11.8%–47.1% dla wzbudzenia sinusoidalnego oraz 2.2%-6.7% dla wzbudzenia poliharmonicznego. Miara określająca przyspieszenia została obniżona odpowiednio o 5.1%-23.0% i 9.5%-19.0%. W kontekście znormalizowanej miary przesunięcia pomiędzy kondygnacjami sterowanie adaptacyjne skutkowało poprawą o 5.2–50.1% w porównaniu z pozostałymi dwoma metodami. Możemy zatem wnioskować, że proponowany algorytm może również obniżać ryzyko niesprężystego odkształcenia konstrukcji, a tym samym zapobiegać trwałym uszkodzeniom konstrukcji. Do podsumowania skuteczności opracowanej metody, przeanalizowaliśmy także wartości średnie rozważanych miar. W porównaniu z metodą LQG metoda adaptacyjna spowodowała redukcję wartości średniej o 9.2%-29.7% w przypadku rozważanych sygnałów

wymuszenia. W porównaniu ze sterowaniem H-nieskończoność redukcja ta wahała się od 19.2% do 47.3%.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie wydajnej metody aktywnego sterowania adaptacyjnego dedykowanej konstrukcjom poddanym działaniu wymuszeń o charakterze okresowym oraz losowym (Sekcja 2).
- Obszerna analiza skuteczności opracowanej metody sterowania w przypadku wielkoskalowej konstrukcji stanowiącej obiekt porównawczy (Sekcja 4).

2.5.6. Opracowanie rozproszonego heurystycznego prawa sterowania do stabilizacji drgań półaktywnych konstrukcji modułowych [A6]

(Pisarski D., Decentralized stabilization of semi-active vibrating structures, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.100, pp.694-705, 2018)

a) Opis problemu badawczego

Artykuł poświęcony jest zagadnieniu stabilizacji drgań półaktywnej konstrukcji wspornikowej. Konstrukcja wyposażona jest w zestaw tłumiących bloków elastomerowych, a jej dynamika opisana została dwuliniowym równaniem różniczkowym. Główną ideą tej pracy było opracowanie praktycznej metody sterowania, która znajduje kompromis między skutecznością stabilizacji drgań a ograniczoną informacją o stanie układu, by spełnić wymogi związane z modułową aranżacją systemu sterowania. Do tego celu zaproponowałem podział konstrukcji na zbiór podukładów obsługiwanych przez indywidualne sterowniki. Następnym krokiem było znalezienie prawa sterowania, które dla każdego podukładu gwarantuje optymalne rozproszenie energii drgań. Zaproponowane przeze mnie podejście czerpie z praktyczności metod opartych na funkcjach Lapunowa oraz wydajności związanej ze sformułowaniem optymalnym. Opracowana metoda prowadzi do przełączających funkcji sterowania, gdzie chwile przełączeń jawnie zależą od zmiennych stanu, które odpowiadają wymaganej architekturze sterownika rozproszonego. W trakcie przeprowadzonych symulacji testowych, szczególnie interesowało mnie, jak wybór architektury rozproszonej wpływa na dyssypację całkowitej energii konstrukcji w przypadku drgań swobodnych zawierających składowe w różnych zakresach częstotliwości.

b) Metodologia

Wyprowadzenie stabilizującego prawa sterowania rozproszonego opierało się na następujących krokach: na wstępie zdefiniowałem zbiór podukładów dynamicznych odpowiadających fragmentom konstrukcji przypisanym do poszczególnych sterowników. Dokonałem tego przez separację zmiennych stanu i wyodrębnienie równań różniczkowych odpowiadającym tym zmiennym. Następnie zdefiniowałem zbiór lokalnych funkcji Lapunowa związanych z energią mechaniczną wyodrębnionych fragmentów konstrukcji. Kolejnym krokiem było znalezienie funkcji sterowania, które zapewniają optymalne chwilowe rozpraszanie energii zdefiniowanych podukładów. Do tego celu sformułowalem zbiór problemów optymalizacji, których celem była minimalizacja pochodnej po czasie lokalnych funkcji Lapunowa. Wykorzystując założoną strukturę funkcji Lapunowa oraz założenia dotyczące zbioru sterowań dopuszczalnych, w sposób analityczny, wyznaczyłem rozwiązania postawionych problemów optymalizacji. Dla każdego ze sterowników rozwiązaniem była funkcja przełączająca, zależna od zmiennych stanu związanych z lokalnym podukładem. Ponadto wykazałem, że przy odpowiednim doborze macierzy układu dynamicznego konstrukcji wyprowadzone przeze mnie sterowanie gwarantuje asymptotyczną stabilność systemu. W celu weryfikacji metody przeprowadziłem szereg

symulacji numerycznych, gdzie założyłem 5 niezależnie działających sterowników, 20 wirtualnych czujników drgań oraz różne architektury systemu sterowania zdefiniowane przez przypisanie różnych podzbiorów czujników do sterowników. Do wyznaczenia podukładów dynamicznych wykorzystałem model konstrukcji bazujący na metodzie elementów skończonych oraz model materiałowy bloków elastomerowych opracowany w pracy [Szmidt2016].

c) Podsumowanie wyników

W pracy rozważyłem trzy następujące architektury systemu sterowania: scentralizowaną (gdzie założyłem, że każdy ze sterowników otrzymuje kompletne informacje o stanie, pobierane przez 20 czujników), zdecentralizowaną (gdzie każdy sterownik otrzymuje informacje z 4-6 sąsiednich czujników) oraz całkowicie zdecentralizowaną (przypisując każdemu ze sterowników wyłącznie 2 sąsiednie czujniki). Pierwsza seria symulacji miała na celu przebadanie, w jaki sposób opracowana metoda sterowania stabilizuje konstrukcję poddaną wymuszeniu udarowemu działającemu na całej długości konstrukcji, które można postrzegać jako związane z silnym wstrząsem lub podmuchem wiatru. W przypadku takiego wymuszenia spodziewałem się zaobserwować drgania konstrukcji, gdzie dominuje mod podstawowy. W pierwszym etapie symulacji zaobserwowałem, że wszystkie trajektorie ugięcia konstrukcji w przypadku rozważanych architektur systemu były niemal identyczne, co wynikało z faktu, że każdy sterownik generował sygnał o maksymalnej dopuszczalnej wartości. Po osiągnięciu pierwszej wartości szczytowej zaobserwowano stopniową rozbieżność trajektorii ugięć, a każda z architektur systemu skutkowała znacznym ograniczeniem prędkości drgań w porównaniu ze strategią tłumienia pasywnego. Ograniczenie prędkości było szczególnie zauważalne w przypadku sterowania scentralizowanego, które w porównaniu z przypadkiem pasywnym spowodowało zredukowanie o 18% drugiej wartości szczytowej w analizowanej trajektorii ugięcia. W porównaniu z przypadkiem zdecentralizowanym redukcja ta wynosiła 1.5%. Dokonując analizy skuteczności stabilizacji układu przy założonych architekturach systemu sterowania, zaobserwowałem, że w przypadku całkowicie zdecentralizowanym wzrost całkowitej energii mechanicznej w porównaniu do przypadku scentralizowanego i zdecentralizowanego wynosi odpowiednio 2.1% i 1.9%. Te niewielkie różnice są wynikiem dominacji podstawowego modu drgań konstrukcji oraz związanej z tym spójności chwil przełączeń realizowanych przez poszczególne sterowniki, niezależnie od wyboru architektury systemu sterowania (chwile przełączeń według założonego prawa sterowania zależą od znaku liniowej kombinacji czynników określonych przez zmienne stanu – te z kolei w przypadku dominacji pierwszego modu drgań zmieniają swoje znaki w niemal identycznym czasie).

Mając na celu weryfikację proponowanej metody w przypadku obecności wyższych modów drgań, kolejne symulacje przeprowadziłem przy założeniu skupionego wymuszenia udarowego działającego na wybrane punkty konstrukcji. Analiza wartości szczytowych trajektorii ugięcia konstrukcji w tym przypadku wykazała, że skuteczność opracowanego sterowania przełączanego w znacznym stopniu zależy od ilości informacji o stanie, jaka zostaje udostępniona poszczególnym sterownikom. Przy zastosowaniu wariantu scentralizowanego i zdecentralizowanego oraz porównaniu wyników ze strategią tłumienia pasywnego zaobserwowałem obniżenie wartości szczytowej ugięcia odpowiednio o 6.2% i 2.8%. W przypadku całkowicie zdecentralizowanym, gdzie zakres informacji o stanie był znacząco ograniczony w stosunku do pozostałych konfiguracji systemu sterowania, zaobserwowałem wzrost wartości szczytowej o 4.8% w porównaniu do przypadku pasywnego. Porównując schematy sygnału przełączającego dla rozważanych architektur systemu sterowania, zaobserwowałem brak spójności w pierwszym etapie symulacji. W dalszej części symulacji, gdy wyższe częstotliwości drgań zostały w dużym stopniu wytłumione, schemat przełączania wracał

do zaobserwowanego w przypadku wymuszenia działającego na całej długości konstrukcji. Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazały, że udział składowych o wyższych częstotliwościach znacząco wpływa na zróżnicowanie skuteczności systemów scentralizowanych i zdecentralizowanych. W praktyce, gdzie celem jest odnalezienie konsensusu między stopniem zdecentralizowania systemu sterowania (związany z ilością informacji o stanie układu dostarczanej do poszczególnych sterowników) a skutecznością stabilizacji drgań, strukturę funkcji sterowania rozproszonego należy dobierać pod kątem oczekiwanej charakterystyki wymuszenia.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie rozproszonego prawa sterowania stabilizującego o niskiej złożoności obliczeniowej (Sekcja 2 oraz 3).
- Obszerna analiza wpływu architektury systemu sterowania na skuteczność stabilizacji drgań konstrukcji (Sekcja 4).

2.5.7. Sformułowanie warunku stabilizowalności oraz opracowanie sterowania optymalnego w problemie tłumienia drgań samowzbudnych typu flutter [A7]

(Pisarski D., Konowrocki R., Szmidt T., Dynamics and optimal control of an electromagnetically actuated cantilever pipe conveying fluid, Journal of Sound and Vibration, Vol.432, pp.420-436, 2018)

a) Opis problemu badawczego

W niniejszej pracy podjęty został problem tłumienia drgań konstrukcji rurowej wywołanych przez transportowany płyn. Do celu sterowania zasugerowano zastosowanie półaktywnego tłumika elektromagnetycznego typu ruchowego (z ang. motional type), który okazał się bardziej skuteczny aniżeli szeroko stosowane w tej kategorii urządzenia typu transformatorowego. Rozważany tłumik składa się z płytki przewodzącej prąd, która porusza się w prostokątnym i stałym polu magnetycznym. Ruch ten generuje prądy wirowe w płytce, a w efekcie siłę tłumienia, co jest konsekwencją prawa Lenza. Ze względu na stałą wartość strumienia magnetycznego siła tłumienia zależy liniowo od prędkości płytki, a zatem urządzenie to działa na podobieństwo tłumików wiskotycznych o współczynniku tłumienia scharakteryzowanym przez geometrię płytki oraz strumień magnetyczny. Dzięki zmianie napięcia w obwodzie elektromagnesu (a tym samym zmianie strumienia magnetycznego) mamy do dyspozycji półaktywne urządzenie sterujące. Warto podkreślić, że urządzenie jest bezстыkowe, co może mieć kluczowe znaczenie przy zastosowaniu w konstrukcjach, w których dołączenie dodatkowej masy – jak w przypadku zastosowania tradycyjnych siłowników mocowanych bezpośrednio do konstrukcji – ma zasadniczy wpływ na stabilność układu. Przy opracowaniu metody sterowania, szczególnie interesowały mnie następujące dwa problemy. Pierwszy z nich dotyczył dynamiki rozpatrywanego układu, który w zależności od prędkości transportowanego płynu charakteryzuje się obszarem stabilnym oraz niestabilnym. W tym zakresie interesowało mnie sformułowanie warunku, który rozstrzyga istnienie stabilizujących funkcji sterowania w warunkach przepływu, w których dowolne rozwiązanie pasywne, przy stałej wartości współczynnika tłumienia, skutkuje dynamiką w obszarze niestabilnym. Drugi problem dotyczył struktury optymalnego sterowania w pętli otwartej z założonym funkcjonałem energetycznym. W tym przypadku moim celem było przebadanie, czy struktura ta jest zachowana dla różnych obszarów dynamicznych i charakteryzuje się wzorcem, który można wykorzystać do opracowania algorytmu adaptacyjnego, w którym funkcja sterowania byłaby dostosowywana do mierzonych parametrów przepływu płynu. Moją intencją było również przeanalizowanie, czy taki wzorzec może zostać wykorzystany do opracowania funkcji sterowania zależnej od zmiennych stanu.

b) Metodologia

Rozważany układ został wstępnie opisany za pomocą równania różniczkowego cząstkowego wiążącego model belki Bernoulliego-Eulera dla konstrukcji rurowej oraz model przepływu tłokowego dla transportowanego płynu. Na potrzeby opracowania sterowania, wykorzystując metodę rozdzielania zmiennych, układ został zdyskretyzowany i przedstawiony w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych. Jako parametr decyzyjny przyjęto sumę kwadratów indukcji, co pozwoliło ostatecznie doprowadzić rozważane równanie dynamiczne do postaci dwuliniowej. Dla takiego systemu zdefiniowaliśmy funkcjonal jakości sterownia związany z całkowitą energią konstrukcji, który posłużył jako miara stabilności i optymalności. Następnie sformułowaliśmy warunek wystarczający istnienia funkcji sterowania, która gwarantuje poprawę wartości przyjętego funkcjonału w porównaniu z przypadkiem zachowawczym, gdzie przyjęto stałą maksymalną dopuszczalną wartość parametru decyzyjnego oraz odpowiadający tej wartości przepływ krytyczny. Istnienie takiej funkcji sterowania gwarantuje asymptotyczną stabilność układu. Sprawdzenie sformułowanego warunku wystarczającego sprowadza się do ustalenia wartości funkcji kwadratowej zależnej od stanu oraz stanu sprzężonego (związanego z założonym funkcjonałem) układu - wyznaczonych przy założeniu stałej maksymalnej dopuszczalnej wartości parametru decyzyjnego. Do przeprowadzenia dowodu ww. warunku posłużyłem się elementami rachunku wariacyjnego. Następnym krokiem było sformułowanie problemu sterowania optymalnego, gdzie za funkcjonal celu przyjąłem sumę ważoną energii sprężystości konstrukcji rurowej oraz energii elektrycznej pobieranej przez półaktywne urządzenie sterujące. W celu rozwiązania zadania sterowania optymalnego opracowałem algorytm numeryczny oparty na metodzie najszybszego spadku. Na potrzeby realizacji algorytmu wyznaczyłem równanie dynamiczne stanu sprzężonego oraz wyprowadziłem pochodną funkcjonału celu względem parametru decyzyjnego. Aby przeanalizować działanie sterowania optymalnego, przeprowadziłem serię symulacji numerycznych, w których założyłem różne prędkości przepływu płynu oraz różne położenia urządzenia sterującego. W każdym z analizowanych przypadków odpowiedź układu na sterowanie optymalne była porównywana z odpowiedzią na strategię pasywną, gdzie założyłem stałą wartość parametru decyzyjnego, przy którym ilość zużytej energii elektrycznej przez urządzenie jest taka jak w przypadku optymalnym.

c) Podsumowanie wyników

Pierwszą część symulacji przeprowadzono przy założeniu, że urządzenie półaktywne położone jest w pobliżu środka rury, w punkcie, który odpowiada maksymalnej wartości prędkości krytycznej przepływu. W przypadku niskiej podkrytycznej prędkości przepływu sterowanie optymalne wykazywało wysoką skuteczność stabilizującą. W porównaniu ze strategią pasywną sterowanie optymalne skutkowało obniżeniem pierwszych dwóch wartości szczytowych wychylenia konstrukcji rurowej odpowiednio o 31.7% i 52.2%. Sterowanie optymalne spowodowało również redukcję wartości założonego funkcjonału celu o 33.8%. Analiza przebiegu funkcji sterowania wykazała, że w pierwszym etapie symulacji dominowały przełączenia okresowe. Warto przypomnieć, że rozwiązaniem problemu dwuliniowego sterowania optymalnego jest funkcja typu bang-bang, jeśli funkcjonal celu nie zależy jawnie od zmiennej decyzyjnej. Ponieważ przyjęliśmy dodatkowy człon odpowiadający energii zużytej przez urządzenie sterujące, funkcja sterowania optymalnego wykazywała tendencję do obniżania jej wartości, zapewniając tym samym niższe zużycie energii. W rozpatrywanym przypadku zaobserwowano stopniowy spadek wartości funkcji sterowania w drugiej fazie symulacji, gdzie amplitudy drgań konstrukcji rurowej utrzymywały się na umiarkowanym poziomie. W przypadku przepływu z prędkością wysoką podkrytyczną wzorzec sterowania

z okresowymi przełączeniami zachowany został dla całej symulacji, co wynikało ze znacznie wyższych ugięć konstrukcji rurowej oraz założonej wartości parametru wagowego w funkcjonałe celu, która przedkładała redukcję energii sprężystości konstrukcji nad obniżenie zużycia energii elektrycznej przez urządzenie półaktywne. W porównaniu z przypadkiem pasywnym, redukcje szczytowego wychylenia konstrukcji oraz wartości założonego funkcjonatu celu wyniosły odpowiednio 81.2% i 84.9%. W przypadku przepływu z prędkością niską nadkrytyczną sterowanie optymalne skutkowało trajektorią niestabilną. Niemniej jednak, w porównaniu z przypadkiem pasywnym, sterowanie to znacznie spowolniło szybkość narastania amplitudy drgań. W rezultacie sterowanie optymalne spowodowało obniżenie szczytowego wychylenia konstrukcji w ostatnim etapie symulacji o 85.4% oraz redukcję wartości funkcjonatu celu o 84.9%. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, w przebiegu funkcji sterowania wyraźnie dominowała struktura okresowego przełączania. Pozostałą część symulacji numerycznych wykonano dla przypadków, w których przyjęto, że urządzenie półaktywne umieszczone jest odpowiednio w pobliżu punktu utwierdzenia konstrukcji oraz w jej punkcie końcowym. W przypadku pierwszej lokalizacji, przy zastosowaniu sterowania optymalnego, zaobserwowano marginalną poprawę o 0.2-1.2% wartości funkcjonatu celu w porównaniu ze strategią pasywną. W przypadku urządzenia umieszczonego na końcu konstrukcji poprawa ta wyniosła 22.7%-59.5%. Zaobserwowany okresowy przebieg funkcji sterowania optymalnego pozwolił na opracowanie praktycznego i wydajnego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. Metoda została zweryfikowana doświadczalnie na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym, a wyniki opublikowano w pracy [Szmidt2019].

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Sformułowanie oraz formalny dowód warunku stabilizowalności (Sekcja 5).
- Opracowanie sterowania optymalnego (Sekcja 6).
- Weryfikacja opracowanej metody w szerokim zakresie parametrów układu (Sekcja 7).
- Analiza struktury optymalnych funkcji sterowania. Wyniki tej analizy pozwoliły na opracowanie sterowania w pętli sprzężenia zwrotnego (Sekcja 7 oraz artykuł [Szmidt2019]).

2.5.8. Opracowanie metody adaptacji czasów przełączeń w sterowaniu optymalnym konstrukcji półaktywnych poddanych działaniu wymuszenia o zmiennej charakterystyce [A8] (Pisarski D., Myśliński A., Online adaptive algorithm for optimal control of structures subjected to travelling loads, *Optimal Control Applications and Methods*, Vol.38, No.6, pp.1168-1186, 2017)

a) Opis problemu badawczego

W pracy [Pisarski2018] wykazałem, że problem optymalnej półaktywnej stabilizacji konstrukcji drgającej poddanej ruchomemu obciążeniu prowadzi do przełączających funkcji sterowania. Zademonstrowałem również, że zmiany prędkości ruchomego obciążenia istotnie wpływają na czasy przełączania tych funkcji. Przedstawiona w artykule [Pisarski2018] metoda wyznaczania optymalnych czasów przełączania dedykowana jest do zastosowań w trybie offline i nie gwarantuje zbieżności umożliwiającej szybkie ponowne wyznaczenie sterowania optymalnego przy zmianach prędkości ruchomego obciążenia. Celem niniejszej pracy było opracowanie metody umożliwiającej adaptację funkcji sterowania w czasie rzeczywistym, która pozwoli na uwzględnienie zmian dotyczących zarówno prędkości ruchomego obciążenia, jak i stanu początkowego konstrukcji. Do tego celu zaproponowałem wykorzystanie rozwiązania problemu sterowania optymalnego, obliczonego wstępnie dla pewnego założonego przejazdu referencyjnego, oraz opracowanie wydajnego algorytmu, który modyfikuje czasy przełączania funkcji sterowania rozwiązania referencyjnego w zależności od rzeczywistych pomiarów

prędkości ruchomego obciążenia oraz stanu konstrukcji. Do utworzenia algorytmu zamierzałem wykorzystać zbiór wstępnie obliczonych funkcji określających wrażliwość dynamiki układu na zmiany prędkości oraz stanu początkowego konstrukcji. Algorytm adaptacyjny miał charakteryzować się niskim kosztem obliczeń wykonywanych w czasie rzeczywistym, jak również wysoką skutecznością stabilizacji drgań konstrukcji w szerokim zakresie zmian prędkości ruchomego obciążenia.

b) Metodologia

Na potrzeby opracowania sterowania dynamika konstrukcji opisana wstępnie równaniem różniczkowym cząstkowym została przedstawiona w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych po zastosowaniu metody separacji zmiennych przestrzennych i czasu. Dla takiego układu zdefiniowałem funkcjonal celu związany z energią całkowitą konstrukcji, a następnie sformułowałem problem sterowania optymalnego. Celem tego problemu było wyznaczenie funkcji sterowania, która przy zadanej prędkości przejazdu ruchomego obciążenia oraz zerowym stanie początkowym układu minimalizuje założony funkcjonal. Korzystając z warunku koniecznego optymalności oraz metody najszybszego spadku, opracowałem algorytm, który prowadzi do optymalnego rozwiązania referencyjnego. Przy założeniu, że dysponujemy systemem pomiarowym, który w każdej chwili czasu umożliwia oszacowanie rzeczywistej prędkości ruchomego obciążenia oraz zmiennych stanu konstrukcji, kolejnym krokiem było opracowanie metody umożliwiającej adaptację (w czasie rzeczywistym) optymalnych funkcji sterowania do aktualnych pomiarów. W tym celu zaproponowałem wykorzystanie optymalnego rozwiązania referencyjnego oraz zbioru funkcji charakteryzujących wrażliwość dynamiki układu na mierzone parametry. Rolą funkcji wrażliwości było dostosowanie czasów przełączania funkcji będącej rozwiązaniem referencyjnym odpowiednio do zmian prędkości obciążenia oraz stanu konstrukcji. Funkcje wrażliwości zostały wyznaczone w trybie offline poprzez rozwiązanie odpowiedniego układu równań różniczkowych zwyczajnych. Korzystając z przebiegów wstępnie obliczonych funkcji wrażliwości oraz aproksymacji stanu i stanu sprzężonego, które zostały wyznaczone przy użyciu rozwiązania referencyjnego, opracowałem formułę do wyznaczania kierunków modyfikacji czasów przełączeń funkcji sterowania. Adaptacja sterowania optymalnego opierała się na koncepcji sterowania z przesuwającym horyzontem czasu. Rozważyłem ciąg problemów sterowania optymalnego z rosnącym czasem początkowym, lecz stałym czasem końcowym, który odpowiadał czasowi przejazdu obciążenia po konstrukcji przy założeniu stałej prędkości referencyjnej. Sformułowanie to umożliwiło wykorzystanie optymalnych rozwiązań referencyjnych. Wyznaczone wstępnie funkcje wrażliwości oraz mierzone w sposób ciągły perturbacje prędkości przejazdu obciążenia, oraz zmiennych stanu w odniesieniu do ich wartości referencyjnych pozwoliły na okresową adaptację czasów przełączania funkcji sterowania. W celu przebadania skuteczności sterowania adaptacyjnego przeprowadziłem symulacje numeryczne w przypadku kilku wariantów przejazdu ruchomego obciążenia, zakładając zarówno stałe, jak i zmienne charakterystyki prędkości. Dla każdego z wariantów dokonałem porównania metody adaptacyjnej ze sterowaniem będącym rozwiązaniem problemu referencyjnego oraz z najlepszym rozwiązaniem pasywnym, które w tym przypadku odpowiadało działaniu tłumików ze stałą maksymalną dopuszczalną wartością współczynnika tłumienia. Dodatkowo wyniki zestawiałem z przypadkiem sterowania optymalnego, wyznaczonego przy założeniu pełnej znajomości charakterystyki prędkości ruchomego obciążenia. Działanie algorytmu adaptacyjnego przebadiałem również ze względu na częstotliwość aktualizacji czasów przełączania funkcji sterowania.

c) Podsumowanie wyników

Pierwsza część symulacji została przeprowadzona w przypadku, gdzie założyłem, że optymalne rozwiązanie referencyjne zostało obliczone przy stałej prędkości przejazdu ruchomego obciążenia wynoszącej 8 m/s, a bazujące na nim sterowanie adaptacyjne zostało przetestowane w przypadku stałej prędkości 8, 9 oraz 12 m/s. Zgodnie z oczekiwaniami, w przypadku prędkości 8 m/s algorytm adaptacyjny nie spowodował zmiany czasów przełączania funkcji sterowania, co wynika z optymalności trajektorii referencyjnej. Przy podwyższeniu prędkości ruchomego obciążenia do 9 m/s, metoda adaptacyjna skutkowałą redukcją wartości funkcjonału celu względem sterowania referencyjnego o 5.3%. W przypadku prędkości 12 m/s redukcja ta wyniosła 40.1%. W zestawieniu ze sterowaniem optymalnym, obliczonym przy założeniu znajomości prędkości przejazdu, algorytm adaptacyjny spowodował nieznaczne pogorszenie wartości funkcjonału celu o 2.2%. Skuteczność metody adaptacyjnej potwierdzono również przy założeniu zmiennej prędkości ruchomego obciążenia. W przypadku, gdzie przyjąłem charakterystykę prędkości obciążenia z wartością początkową wynoszącą 12 m/s oraz fazami przyspieszenia i opóźnienia, poprawa w stosunku do rozwiązania referencyjnego wyniosła 98.6%. W odniesieniu do przypadku optymalnego strategia adaptacyjna okazała się gorsza o 4.2%. W przypadku wyższych prędkości przejazdu ruchomego obciążenia obserwowałem stopniową utratę skuteczności strategii adaptacyjnej, co było wynikiem degradacji efektywności rozwiązania referencyjnego, które stanowiło podstawę do aktualizacji czasów przełączeń funkcji sterowania. Zweryfikowałem również, że proponowana metoda może być skutecznie zastosowana w obecności zaburzeń stanu początkowego, które mogą wystąpić w przypadku następujących po sobie przejazdów. Studium przypadków wykazało również, że istnieje szeroki zakres częstotliwości aktualizacji czasów przełączania funkcji sterowania, przy którym metoda adaptacyjna gwarantuje skuteczność zbliżoną do tej, jaka wynika z rozwiązań zadania sterowania optymalnego.

d) Najważniejsze osiągnięcia

- Opracowanie sterowania adaptacyjnego dla szerokiej klasy konstrukcji półaktywnych poddanych działaniu wymuszenia o zmiennej charakterystyce (Sekcja 3 oraz 4).
- Opracowanie wydajnego algorytmu dostosowywania czasów przełączania funkcji będącej rozwiązaniem problemu dwuliniowego sterowania optymalnego (Sekcja 5).
- Obszerna analiza skuteczności opracowanej metody z uwzględnieniem zaburzeń parametru wymuszenia oraz stanu początkowego (Sekcja 6).

3. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej

3.1. Współpraca z Dr Fabio Morbidi (Université de Picardie Jules Verne, Amiens, Francja)

Dr Fabio Morbidi jest adiunktem (Maître de Conférences) w laboratorium MIS (modelowanie, informacja i systemy) na Université de Picardie Jules Verne w Amiens we Francji. Dr Morbidi jest specjalistą w zakresie sterowania wieloagentowych układów dynamicznych. Wśród aplikacji analizowanych przez doktora Morbidi znajdują się robotyka mobilna, cybernetyka, systemy wizyjne oraz systemy transportu. Moja współpraca z doktorem Morbidi rozpoczęła się w 2012 roku w INRIA Rhone-Alpes, Grenoble, Francja. Podczas realizacji projektu unijnego „HYCON 2” wspólnie pracowaliśmy nad rozwojem platformy numerycznej do prognozowania i optymalizacji ruchu pojazdów po autostradach w kontekście Grenoble Traffic Lab. Oprócz pracy nad zadaniami projektu prowadziliśmy dyskusje na temat możliwych zastosowań zdecentralizowanych metod sterowania w inżynierii mechanicznej. W lutym 2019 r. odwiedziłem laboratorium MIS, aby wznowić współpracę

naukową z doktorem Morbidi i wspólnie przygotowaliśmy wniosek projektowy dotyczący optymalnego zarządzania energią bezałogowych statków powietrznych [OptoPlus2020] (projekt zostanie wysłany do Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej do programu wymiany bilateralnej naukowców pomiędzy Polską a Francją PHC Polonium w połowie 2022 roku). W ciągu ostatnich dwóch lat zespoły MIS oraz ZTI IPPT PAN odbyły kilka wymian, a kulminacją współpracy badawczej była wizyta doktora Morbidi w IPPT PAN w lutym 2020 roku, podczas której prace dotyczące optymalnego sterowania bezałogowych statków powietrznych zostały sfinalizowane, a jej wyniki opublikowano na konferencji IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [Morbidi2021]. W lipcu 2021 roku dr Morbidi po raz kolejny odwiedził IPPT PAN, a rezultatem tej wizyty będzie publikacja w czasopiśmie naukowym (praca zostanie wysłana do czasopisma na początku 2022 roku).

Wyniki współpracy z Dr Fabio Morbidi:

- [Morbidi2021] Morbidi F., Pisarski D., Practical and accurate generation of energy-optimal trajectories for a planar quadrotor, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021-05-30/06-05, Xi'an (China), pp.1-7, 2021;
- [OptoPlus2020] Morbidi F., Pisarski D., Projekt "OptoPlus: Optimal energy management for extended flight endurance of battery-powered multi-rotor UAVs".

3.2. Współpraca z Profesorem Andrzejem Myślińskim (Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa)

Profesor Andrzej Myśliński z Instytutu Badań Systemowych PAN w Warszawie specjalizuje się w zagadnieniach dotyczących modelowania i optymalizacji w mechanice. Moja współpraca z profesorem Myślińskim rozpoczęła się w 2009 roku podczas realizacji projektu „Interaktywne środowisko do rozwiązywania zadań sterowania optymalnego – IDOS”, gdzie wspólnie opracowywaliśmy algorytmy numeryczne do sterowania optymalnego układów opisanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi [Bajer2012]. Opracowane procedury pozwoliły na stworzenie unikalnego środowiska programowania do rozwiązywania szerokiej klasy eliptycznych i parabolicznych problemów sterowania optymalnego. W latach 2014-2015 profesor Myśliński pełnił funkcję mentora naukowego w kierowanym przeze mnie projekcie HOMING PLUS – „Real-time distributed adaptation of structures subjected to travelling loads”, gdzie wspólnie opracowaliśmy metodę adaptacyjnego sterowania konstrukcji poddanej działaniu ruchomego obciążenia [Pisarski2018], [A8]. Współpracę z profesorem Myślińskim kontynuowałem latach 2018-2021 w trakcie realizacji kierowanego przeze mnie projektu SONATA – „Adaptacyjne rozproszone tłumienie drgań konstrukcji modułowych”. Współpraca w ramach tego projektu zaowocowała oryginalnymi wynikami dotyczącymi rozproszonego sterowania suboptymalnego do tłumienia drgań konstrukcji półaktywnych [A4].

Wyniki współpracy z Profesorem Andrzejem Myślińskim:

- [A8] Pisarski D., Myśliński A., Suboptimal distributed state-feedback control of semi-active vibrating systems, Journal of Sound and Vibration, Vol.443, pp.637-651, 2019;
- [Pisarski2018] Pisarski D., Myśliński A., Online adaptive semi-active vibration damping of slender structures subject to moving loads, ICoEV 2017, International Conference on Engineering Vibration, 2017-09-04/09-07, Sofia (BG), No.148, pp.1-6, 2018;
- [A4] Pisarski D., Myśliński A., Online adaptive algorithm for optimal control of structures subjected to travelling loads, Optimal Control Applications and Methods, Vol.38, No.6, pp.1168-1186, 2017;

- [Bajer2012] Bajer C.I., Myśliński A., Żochowski A., Dyniewicz B., Pisarski D., Interactive computer environment for solving optimal problems-IDOS, chapter: Solving optimal control problems described by PDEs, Ed. R. Pytlak, pp.347-394, 2012.

4. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Będąc zatrudnionym w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki, brałem czynny udział w promocji pracy doktorskiej oraz magisterskiej, jak również popularyzacji nauk technicznych. Poniżej przedstawiam szczegóły mojej aktywności.

4.1 Opieka promotorska

- 2015-2019 – Promotor pomocniczy pracy doktorskiej Pana Macieja Wasilewskiego zatytułowanej „Adaptive stabilization algorithms for engineering systems subjected to change of structural parameters and excitations”. Praca została obroniona z wyróżnieniem w dniu 2019-11-28 w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.
- 2014-2015 – Opiekun pracy przejściowej oraz magisterskiej Pana Macieja Wasilewskiego. Praca magisterska zatytułowana „Półaktywne sterowanie tłumieniem konstrukcji przenoszących ruchome obciążenie” została obroniona w dniu 2015-09-17 na Politechnice Warszawskiej.

4.2 Popularyzacja nauki

- 2021 – Prezentacja na XXV Festiwalu Nauki na temat zastosowań ultra szybkiej kamery, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa.
- 2020 – Prezentacja na XXIV Festiwalu Nauki pt. „Czy technologia może być inteligentna?”, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa.
- 2019 – Prezentacja na XXIII Festiwalu Nauki pt. „Czy technologia może być inteligentna?”, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa.
- 2018 – Prezentacje na 22 Pikniku Naukowym Polskiego Radia I Centrum Nauki Kopernik na temat napędów elektrycznych oraz kamery termowizyjnej, Stadion Narodowy, Warszawa.
- 2018 – Prezentacje na 21 Pikniku Naukowym Polskiego Radia I Centrum Nauki Kopernik na temat napędów elektrycznych, Stadion Narodowy, Warszawa.

LITERATURA

[Karnopp1974] Harwood R., Karnopp D., Crosby M., Vibration control using semi-active force generators, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.96, pp.619-626, 1974

[Leitmann1994] Leitmann G., Semiactive control for vibration attenuation, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, No.6, pp. 841-846, 1994

[Mroz2010] Mroz A, Orłowska A, Holnicki-Szulc J, Semi-active damping of vibrations, Prestress accumulation-release strategy development, Shock and Vibration, Vol.17, No.2, pp.123-136, 2010

[Pisarski2010] Pisarski D., Bajer C.I., Semi-active control of 1D continuum vibrations under a travelling load, Journal of Sound and Vibration, Vol.329, pp.140-149, 2010

[Pisarski2018] Pisarski D., Optimal control of structures subjected to traveling load, Journal of Vibration and Control, Vol.24, No.7, pp.1283-1299, 2018

[Palacios2011] Palacios-Quiñonero F., Rossell J.M., Karimi H.R., Semi-decentralized strategies in structural vibration control, Modeling, Identification and Control, Vol.32, No.2, pp.57-77, 2011

[Szmidt2016] Szmidt T., Shear deformation damping of a double-beam structure, Journal of Sound and Vibration, Vol.370, pp.163-175, 2016

[Szmidt2019] Szmidt T., Pisarski D., Konowrocki R., Semi-active stabilisation of a pipe conveying fluid using eddy-current dampers: state-feedback control design, experimental validation, Meccanica, Vol.54, No.6, pp.761-777, 2019

Warszawa, 19.01.2022 r.